



**Universidade de
Aveiro
2011**

Departamento de Engenharia Civil

**FÁTIMA ISABEL
SILVA LOPES**

**ESTUDO DA REFLEXÃO DE FENDAS EM
PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha Família.

O júri

Presidente

Prof.^a Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Jorge Carvalho Pais
Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível graças ao incentivo e apoio de inúmeras pessoas, que directa ou indirectamente contribuíram para a sua concretização. Gostaria de expressar aqui o meu reconhecimento a todos os que me ajudaram no decurso desta caminhada.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Paulo Cachim e ao meu co-orientador Professor Doutor Agostinho Benta, pela disponibilidade, ensinamentos e pelo acompanhamento científico que me concederam.

Ao Engenheiro Luís Silva pela disponibilidade que sempre me demonstrou e no auxílio que me prestou para uma melhor compreensão das modelações numéricas.

Agradeço ao meu namorado, Nuno Oliveira, aos meus queridos pais, António Cardoso e Maria Patrão, às minhas irmãs Elisabete Coelho, Marília Santos, Gabriela Lopes e Carla Santos, aos meus cunhados e sobrinhos/as, por acreditarem sempre no meu trabalho, pelo apoio e carinho que sempre me deram.

Aos meus amigos e amigas, por todos os momentos alegres e óptima companhia que me proporcionaram ao longo do meu percurso académico.

A todos, o meu
Muito Obrigado!

Palavras-chave

reflexão de fendas; fissuras; pavimentos semi-rígidos; camada de base; pavimento fendilhado; degradações em pavimentos; modelação numérica; tensão instalada.

Resumo

O objectivo do presente trabalho é o de contribuir para uma melhoria do conhecimento do comportamento dos pavimentos rodoviários do tipo semi-rígido, através da análise dos processos de degradação conducentes ao aparecimento do fenómeno da reflexão de fendas.

No campo de estudos dos pavimentos semi-rígidos surge o interesse de analisar o comportamento das fendas existentes na camada de base estrutural do pavimento e o modo como a sua reflexão se reproduz às camadas superiores, quando este se encontra sujeito a solicitações provenientes do tráfego rodoviário.

Efectuou-se neste trabalho essa análise com recurso à modelação numérica, onde se realizaram diversos modelos-tipo de pavimento semi-rígido no programa de cálculo estrutural Sap2000®. Apresentou-se uma análise comparativa entre esses pavimentos ao nível de tensão instalada, onde se fez variar a posição da carga aplicada (que simula o tráfego rodoviário) e as espessuras das camadas dos vários modelos-tipo de pavimentos. Assim determinou-se como se comporta este tipo de pavimento, quando se encontra fendilhado na camada de base e é solicitado. Com a finalidade de que se encontrem soluções que futuramente não só controlem, mas que evitem esta tendência, observou-se como a fenda se propaga até à superfície e como as cargas são transmitidas nessa zona.

Keywords

reflection cracks; cracks; semi-rigid pavements; base layer; cracked pavement; deterioration in pavement; numerical modelling; installed tension.

Abstract

The aim of this work is to contribute to an improved understanding of the behaviour of semi-rigid road pavements, by analysis of degradation processes leading to the emergence of the phenomenon of reflection cracks.

In field studies of semi-rigid pavements it is intriguing to analyze the behaviour of existing cracks in the base layer of pavement structure and how it reproduces its reflection to the upper layers, while it is subject to requests from road traffic.

This work was carried out this analysis using the numerical modeling, where they underwent various design types of semi-rigid pavement, the structural analysis program SAP2000®. Presenting a comparative analysis between these floors installed at the level of tension, which was varied the position of the applied load (to simulate road traffic) and the thickness of layers of different design types of floors. To thus determine how it behaves this type of pavement, when it is cracked in the base layer and is asked, noting how the cracks propagate to the surface and how the loads are transmitted in the area of the slits. In order that solutions can be found in the future not only to control, but also to avoid this trend.

*“É comprida a estrada que vai
desde a intenção até á execução”.*

(Jean Molière)

ÍNDICE

Índice	I
Índice de Figuras	II
Índice de Tabelas	V
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura geral.....	2
2. Tipologia e Composição dos Pavimentos Rodoviários.....	5
2.1. O Pavimento Rodoviário	5
2.2. Pavimentos Flexíveis	10
2.3. Pavimentos Rígidos	11
2.4. Pavimentos Semi-rígidos	12
3. Degradações em Pavimentos.....	15
3.1. Capacidade de Carga de um Pavimento	15
3.2. Principais Tipos de Degradação em Pavimentos Semi-rígidos	16
3.3. Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos com o Deflectómetro de Impacto	22
4. Reflexão de Fendas em Pavimentos Semi-rígidos	29
4.1. Camada de Base de um Pavimento Semi-rígido	29
4.2. Propagação de Fissuras.....	29
4.2.1. Mecânica da Fractura.....	32
4.2.2. Resistência à Rotura	34
4.3. Soluções para Controlar a Propagação de Fendas	38
5. Modelação de Pavimentos Semi-rígidos Fendilhados na Camada de Base	53
5.1. Modelação Numérica.....	53
5.2. Constituição dos Modelos	54
5.3. Análise da Propagação de Fendas às Camadas Superiores do Pavimento	58
5.3.1. Modelo de Pavimento T1	58
5.3.2. Modelo de Pavimento T3	64
5.3.3. Modelo de Pavimento T6	71
6. Considerações Finais.....	79
6.1. Conclusões.....	79
6.2. Desenvolvimentos futuros	80
Referências Bibliográficas.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Pavimento Rodoviário (BRANCO <i>et al.</i> , 2005).....	6
Figura 2.	Comportamento dos Pavimentos (BATISTA, 2009).	7
Figura 3.	Pavimento Flexível (BATISTA, 2009).	11
Figura 4.	Pavimento Rígido (BATISTA, 2009).....	12
Figura 5.	Pavimento Semi-rígido (BATISTA, 2009).	13
Figura 6.	Pavimento Rodoviário Semi-rígido – estrutura “directa” e estrutura “inversa” (BRANCO <i>et al.</i> , 2005).....	14
Figura 7.	Rodeira devido à baixa capacidade de carga de um pavimento flexível (REIS, 2009).....	16
Figura 8.	Evolução do cavado de rodeira com o tráfego, num pavimento semi-rígido (QUARESMA, 1992).	17
Figura 9.	Evolução do fendilhamento longitudinal num pavimento semi-rígido com o tráfego (QUARESMA, 1992).....	19
Figura 10.	Espaçamento entre fissuras transversais ao longo do tempo (QUARESMA, 1992).....	21
Figura 11.	Deflectómetro de Impacto (ALVES, 2007).....	23
Figura 12.	Princípio de ensaio do Deflectómetro de Impacto (ALVES, 2007).	24
Figura 13.	Execução de sondagem à rotação (à esquerda) e tarolos retirados de um pavimento flexível (à direita) (ALVES, 2007).....	26
Figura 14.	Sondagem por abertura de poço (ALVES, 2007).....	27
Figura 15.	Propagação de fissuras sob a acção dos rodados ou sob acções térmicas (QUARESMA, 1992).	30
Figura 16.	Reflexão de fendas transversal (REIS, 2009).....	31
Figura 17.	Reflexão de fendas longitudinal (REIS, 2009).....	32
Figura 18.	Deslocamentos relativos das faces de uma fissura (QUARESMA, 1992).....	33
Figura 19.	Estado de tensão na extremidade de uma fissura (QUARESMA, 1992).....	33
Figura 20.	Ensaio para caracterização da propagação de fissuras (QUARESMA, 1992).....	35
Figura 21.	Ensaio para caracterização da propagação de fissuras utilizando provetes cilíndricos (QUARESMA, 1992).....	36
Figura 22.	Montagem para simulação da propagação de fissuras sob variações de temperatura (QUARESMA, 1992).	37
Figura 23.	Montagem para simulação da propagação de fissuras sob a acção dos rodados dos veículos (QUARESMA, 1992).....	37
Figura 24.	Número de fissuras transversais por km observado em 1989-2000 (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).	42
Figura 25.	Comprimento médio das fissuras transversais relativamente à largura da faixa de rodagem, observado em 1989-2000 nas várias soluções do pavimento (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).	43
Figura 26.	Evolução do valor médio do índice de gravidade das fissuras transversais observado em 1989-2000 nas várias soluções do pavimento (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).....	44
Figura 27.	Fendilhamento transversal observado em 1989-2000 (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).....	45

Figura 28.	Fendilhamento longitudinal observado em 1989-2000 (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).....	46
Figura 29.	Modelo adoptado para a evolução das degradações (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).....	47
Figura 30.	Indução de fissuras por cravação de perfil metálico no betão pobre (QUARESMA, 1992).	49
Figura 31.	Aplicação de tira de geotêxtil num dos cortes (QUARESMA, 1992)....	49
Figura 32.	Aspecto superficial do agregado usado na penetração betuminosa (QUARESMA, 1992).	49
Figura 33.	Compactação da argamassa betuminosa (QUARESMA, 1992).	50
Figura 34.	Geotêxteis aplicados (QUARESMA, 1992).	50
Figura 35.	Aplicação manual de geotêxtil (QUARESMA, 1992).	50
Figura 36.	Aplicação mecânica de geotêxtil (QUARESMA, 1992).	51
Figura 37.	Geogrelhas aplicadas (QUARESMA, 1992).	51
Figura 38.	Aplicação de uma geogrelha ARMAPAL (QUARESMA, 1992).	51
Figura 39.	Traccionamento da geogrelha TENSAR (QUARESMA, 1992).	52
Figura 40.	Espalhamento do material granular com máquina espalhadora/acabadora (QUARESMA, 1992).	52
Figura 41.	Estrutura de Pavimento Semi-rígido (JAE, 1995).	54
Figura 42.	Esquema tipo das espessuras consideradas no ‘Modelo T1’, fendilhado na camada de base.	57
Figura 43.	Modelação Numérica do ‘Modelo T1 – carga 1 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	59
Figura 44.	Modelação Numérica do ‘Modelo T1 – carga 1 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	59
Figura 45.	Modelação Numérica do ‘Modelo T1 – carga 1 – fenda 6 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	60
Figura 46.	Tracção máxima no pavimento T1 por aplicação da carga 1.	60
Figura 47.	Compressão máxima no pavimento T1 – zona da aplicação da carga 1.	61
Figura 48.	Modelação Numérica do ‘Modelo T1 – carga 2 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	62
Figura 49.	Modelação Numérica do ‘Modelo T1 – carga 2 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	62
Figura 50.	Modelação Numérica do ‘Modelo T1 – carga 2 – fenda 6 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	62
Figura 51.	Tracção máxima no pavimento T1 por aplicação da carga 2.	63
Figura 52.	Compressão máxima no pavimento T1 – zona da aplicação da carga 2.	64
Figura 53.	Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 1 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	65
Figura 54.	Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 1 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	65
Figura 55.	Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 1 – fenda 6 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	66
Figura 56.	Tracção máxima no pavimento T3 por aplicação da carga 1.	66
Figura 57.	Compressão máxima no pavimento T3 – zona da aplicação da carga 1.	67
Figura 58.	Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 2 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	68
Figura 59.	Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 2 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	68

Figura 60.	Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 2 – fenda 6 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	69
Figura 61.	Tracção máxima no pavimento T3 por aplicação da carga 2.	69
Figura 62.	Compressão máxima no pavimento T3 – zona da aplicação da carga 2.	70
Figura 63.	Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 1 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	71
Figura 64.	Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 1 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	72
Figura 65.	Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 1 – fenda 6 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	72
Figura 66.	Tracção máxima no pavimento T6 por aplicação da carga 1.	73
Figura 67.	Compressão máxima no pavimento T6 – zona da aplicação da carga 1.	74
Figura 68.	Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 2 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	75
Figura 69.	Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 2 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	75
Figura 70.	Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 2 – fenda 6 mm’. Tensões Máximas (Smáx).	75
Figura 71.	Tracção máxima no pavimento T6 por aplicação da carga 2.	76
Figura 72.	Compressão máxima no pavimento T6 – zona da aplicação da carga 2.	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (BRANCO <i>et al.</i> , 2005).....	8
Tabela 2. Principais tipos de degradação em pavimentos semi-rígidos (QUARESMA, 1992).....	18
Tabela 3. Estruturas de pavimento realizadas no lanço Celorico da Beira/Guarda (IP5) (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).	41
Tabela 4. Extensão e custo relativo das várias soluções (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).....	41
Tabela 5. Materiais utilizados no estudo (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).	44
Tabela 6. Apreciação comparativa do comportamento das diferentes soluções de pavimentação (L. QUARESMA <i>et al.</i> , 2002).	47
Tabela 7. Espessuras dos modelos utilizados nas modelações numéricas.	55
Tabela 8. Características mecânicas dos materiais usados na modelação numérica. .	57

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo procede-se ao enquadramento do trabalho focando os objectivos e a estratégia adoptada na organização da presente dissertação.

1.1. Enquadramento

O pavimento rodoviário permite a circulação dos veículos, ao qual se exige e se deve assegurar a segurança e conforto a quem nele circula (BRANCO *et al.*, 2005). São vastos os estudos efectuados na procura de uma estrutura de pavimento rodoviário melhorado e que tenha um bom desempenho a todos os níveis. A nível estrutural pretende-se que não apresente significativas deformações, nem fendilhação ao longo do tempo de vida para o qual é projectado. A nível construtivo, que seja efectuado de modo rápido, eficiente e economicamente viável.

A acção do tráfego e as acções climáticas dão origem ao fendilhamento em pavimentos rodoviários. As fendas geram descontinuidades na estrutura do pavimento e causam alterações na distribuição das tensões, provocando o seu aumento nas proximidades das descontinuidades. Ao existir uma fenda num pavimento, esta aumenta em extensão, severidade e intensidade, levando à sua desagregação. A velocidade de deterioração do pavimento aumenta logo após o início da fendilhação, tendo efeitos particularmente importantes na progressão das rodeiras e da irregularidade do pavimento (VILCHEZ, 2002). Para que um pavimento desempenhe adequadamente as suas funções, deverá possuir suficiente capacidade de carga. A capacidade de carga varia com o tempo e depende do tipo de utilização do pavimento. Define-se como uma característica do estado estrutural de um pavimento, que por sua vez se encontra relacionada com a sua capacidade de suportar as acções devidas ao tráfego futuro (ANTUNES, 1993).

Os pavimentos semi-rígidos são constituídos por uma camada de desgaste betuminosa, executada sobre uma camada em mistura com ligante hidráulico, sendo esta, a camada

de base, que desempenha um papel importante ao nível do comportamento estrutural do pavimento. Comparando com outros tipos de pavimentos, a particularidade deste pavimento, é a existência de fissuras na camada de base, originadas por variações térmicas e higrométricas (QUARESMA, 1992). Sendo assim, pretende-se com este trabalho desenvolver um estudo numérico sobre a propagação destas fissuras ao nível estrutural, ou seja, desde a camada de base até à superfície do pavimento, para que futuramente se possam encontrar mais soluções que contrariem esta tendência, evitando que sob a acção do tráfego, a degradação deste tipo de pavimento seja tão rápida.

1.2.Objectivos

Pretende-se com este trabalho estudar em que medida a formação das fissuras na camada de base do pavimento semi-rígido condicionam o estado de tensão/deformação que ocorre na estrutura. Sabe-se que a presença de fissuras nesta camada causa uma concentração de tensões na zona inferior da camada sobrejacente, sobretudo sob a acção do tráfego, mas também sob a acção de variações térmicas. O que privilegia a iniciação de fissuras naquela zona e ao qual se segue a propagação das mesmas, desde a camada de base até à superfície do pavimento.

Neste trabalho pretende-se focar essencialmente a propagação dessas fissuras ao nível de tensões instaladas no pavimento, sob a acção do tráfego. Verificando de que modo essas fendas se propagam à superfície e analisando como provocam a degradação crescente do pavimento do tipo semi-rígido.

1.3.Estrutura geral

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos, incluindo este primeiro capítulo, onde se procede ao enquadramento e objectivos do trabalho, através de uma breve nota introdutória.

O capítulo 2 descreve sinteticamente os vários tipos de pavimentos rodoviários, nomeadamente os flexíveis, rígidos e semi-rígidos, fazendo referência à sua constituição, comportamento estrutural e funcional.

No capítulo 3 são mencionados os factores que levam à degradação dos pavimentos, focando essencialmente os pavimentos semi-rígidos. Apresenta-se ainda a noção de capacidade de carga de um pavimento e faz-se referência ao deflectómetro de impacto, como instrumento essencial utilizado para avaliar o estado de degradação dos pavimentos.

No capítulo 4 é abordada a temática da reflexão de fendas em pavimentos semi-rígidos. Fazendo referência de como a existência de fissuras na camada de base, se traduz geralmente numa redução da capacidade de distribuição das cargas entre as faces das fissuras, o que irá provocar uma propagação dessas fissuras às camadas superiores do pavimento, revelando-se numa problemática já conhecida ao nível estrutural do pavimento.

O capítulo 5 é constituído pelas modelações numéricas efectuadas com o programa Sap2000, onde através de uma análise de tensões se procede à observação crítica da propagação de uma fenda existente na camada de base até às camadas superiores do pavimento semi-rígido.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões alcançadas e tecem-se algumas considerações relativas ao prosseguimento de trabalhos futuros.

2. TIPOLOGIA E COMPOSIÇÃO DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Apresenta-se neste capítulo uma breve descrição dos diversos Pavimentos Rodoviários, bem como a constituição e comportamento estrutural de cada um deles.

2.1. O Pavimento Rodoviário

A função principal de um pavimento rodoviário é o de assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante a vida do pavimento, sob a acção do tráfego e nas condições climáticas adversas (BRANCO *et al.*, 2005).

A um pavimento deve exigir-se dois tipos de qualidades: a qualidade funcional e a qualidade estrutural. A primeira relacionada com as exigências dos utentes, com o conforto e segurança de circulação. A segunda relacionada com a capacidade do pavimento para suportar as cargas dos veículos, sem sofrer alterações para além de determinados valores limites, as quais colocariam em causa a garantia da qualidade funcional, aquela que é captada pelos utentes rodoviários (BRANCO *et al.*, 2005).

Um pavimento rodoviário é um sistema multi-estratificado, formado por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural (maciço semi-indefinido). Encontra-se assim esquematizada na Figura 1, a composição de um pavimento rodoviário, sujeito a solicitações e a acções climáticas:

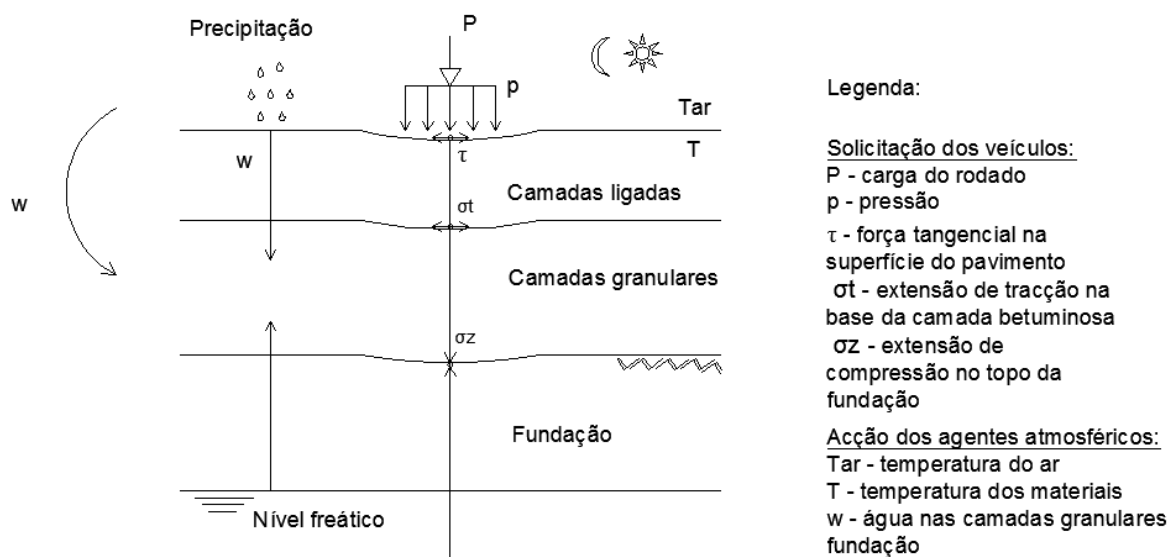


Figura 1. Pavimento Rodoviário (BRANCO *et al.*, 2005).

Para além da fundação, como mostra a Figura 1, distinguem-se ainda as duas componentes principais do pavimento: o conjunto das ‘camadas ligadas’, constituídas por materiais granulares (britas e areias) estabilizados com ligantes, colocadas na parte superior do pavimento. E as ‘camadas granulares’ constituídas por materiais inertes, britados ou naturais, não aglutinados, colocados na parte inferior do pavimento.

Encontram-se ainda indicadas na Figura 1, as acções devidas ao tráfego (traduzidas pelas cargas dos rodados) e as acções climáticas (traduzidas quer por variações de temperatura dos materiais das camadas, quer pela acção da água que atinge as várias componentes do pavimento).

As camadas de um pavimento podem distinguir-se pelas funções que desempenham, a camada superficial é designada por ‘camada de desgaste’ e as restantes camadas são designadas por ‘corpo do pavimento’. A camada de desgaste tem a função de assegurar as características funcionais, ou seja, deve contribuir para uma circulação com conforto e segurança. Deve ainda assegurar a impermeabilização do pavimento, evitando assim a entrada de água exterior para as camadas inferiores e para o solo de fundação. O corpo do pavimento, é o principal responsável pela capacidade do pavimento em suportar as cargas provenientes do tráfego rodoviário, pode compreender camadas estabilizadas com ligantes (betuminosos ou hidráulicos) e também camadas granulares.

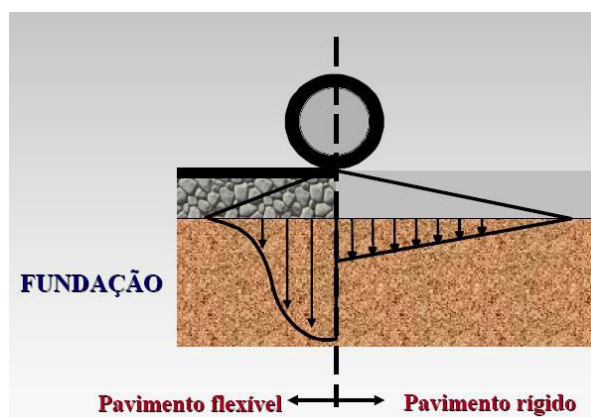


Figura 2. Comportamento dos Pavimentos (BATISTA, 2009).

As diversas camadas do pavimento dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade (Figura 2). Têm também a função de assegurar o apoio para a realização da camada sobrejacente. Assim sendo, no caso das camadas betuminosas, a camada sobrejacente à camada de desgaste designa-se por ‘camada de regularização’. De seguida dispõem-se ‘camadas de base’ aglutinadas ou não. Estas encontram-se assentes na camada inferior do corpo do pavimento, designada por ‘camada de sub-base’ e é normalmente constituída por materiais granulares estabilizados mecanicamente por compactação, podendo também ser tratada com cimento, sendo construída directamente sobre a fundação. A fundação é constituída pelo terreno natural, embora quando este não tem as características desejadas, sobrepõe-se-lhe uma camada de solo melhor, por vezes tratado com ligantes, ao qual se dá o nome de ‘leito do pavimento’ e que faz parte integrante da fundação do pavimento. O leito do pavimento tem como função aumentar a capacidade de suporte da fundação e a de homogeneizar as suas características resistentes (BRANCO *et al.*, 2005).

Da associação de várias camadas constituídas por diferentes materiais, resultam diferentes tipos de pavimentos, ao qual correspondem naturalmente a comportamentos diferentes quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com determinadas condições climáticas.

De acordo com dois critérios de classificação dos pavimentos rodoviários, o tipo de materiais e a deformabilidade, podem distinguir-se os seguintes tipos de pavimentos: flexíveis, rígidos e semi-rígidos, tal como indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade
(BRANCO *et al.*, 2005).

Tipo de Pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonatos e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito Reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonatos, hidráulicos e granulares	Reduzida

Cada um destes três pavimentos, sob acção de uma determinada carga, apresenta diferentes valores de deformação vertical da sua superfície. Dependendo da constituição e do estado de conservação de um pavimento, submetido à acção da carga de um eixo com a carga total de 130 kN, ou seja 65 kN aplicados numa ‘roda dupla’, podem ser encontrados os seguintes intervalos de valores de deformação (BRANCO *et al.*, 2005):

- (i) pavimento flexível com valores a variar entre 250 e 500 μm ;
- (ii) pavimento semi-rígido com valores entre 200 e 400 μm ;
- (iii) pavimento rígido com valores da deformabilidade muito reduzidos, em geral inferiores a 200 μm .

Mas, para um pavimento degradado, por exemplo com elevado estado de fendilhação, estes valores serão bastante superiores, em qualquer tipo de pavimento. Pois, o comportamento de um pavimento rodoviário é determinado pelas acções do tráfego e climáticas que sobre ele actuam, pela sua constituição, ou seja pelo número e espessura das camadas e pelas características dos materiais, e ainda pelas características da fundação (BRANCO *et al.*, 2005).

Em relação às acções, consideram-se dois grandes grupos: as resultantes da aplicação das cargas dos veículos e as resultantes da acção dos agentes climáticos. As cargas podem ser expressas por uma pressão vertical (considerada uniforme e aplicada numa área circular) na superfície do pavimento e por uma acção tangencial aplicada no plano

entre o pneu e o pavimento, correspondente à reacção necessária para o movimento do veículo e às acções que ocorrem durante as frenagens. A intensidade e a forma de aplicação das cargas dos veículos determinam diferentes comportamentos dos pavimentos, em particular devido ao facto de muitos materiais, em especial os betuminosos, terem comportamentos que variam com o modo como são solicitados.

Quanto às acções climáticas, que são representadas pela temperatura e pela água, têm uma influência relevante no comportamento e evolução dos pavimentos, em particular naqueles que possuem uma componente betuminosa mais expressiva e também uma elevada componente particular. A temperatura do ar determina, em cada instante, a temperatura das camadas, o que condiciona a rigidez das camadas betuminosas, que varia no sentido inverso da temperatura. Por sua vez, a água, com origem na fundação do pavimento ou proveniente do exterior através da superfície do pavimento, determina o teor em água das camadas granulares e do solo de fundação, cuja resistência em geral, se reduz à medida que aquele teor aumenta (BRANCO *et al.*, 2005).

Na constituição do pavimento devem distinguir-se ainda dois tipos de camadas: as camadas ligadas, dotadas de coesão, com capacidade para suportar todos os tipos de esforços (compressão, tracção e corte) e as camadas não ligadas, em que a resistência depende essencialmente do atrito interno e que tal como o solo, apenas suportam bem esforços de compressão e de corte.

Da aplicação das acções externas sobre a estrutura de um pavimento resulta, em cada ponto, um estado de tensão e deformação. Os principais esforços habitualmente considerados na análise do funcionamento de um pavimento, são os que determinam as tensões e extensões horizontais de tracção (σ_t ; ϵ_t) nas camadas estabilizadas com ligantes, de valor máximo nas suas faces inferiores, em geral no eixo de simetria de aplicação da carga, e os esforços que determinam as extensões de compressão (σ_z ; ϵ_z) nas camadas granulares e na fundação, também na vertical da carga (ver a Figura 1). Os esforços produzidos a cada passagem de um veículo vão provocando progressivas alterações dos materiais constituintes do pavimento, as quais vão determinando a redução da sua qualidade, traduzida por determinadas degradações. Estas consistem, nos casos mais correntes, sobretudo na ocorrência de fendilhamento das camadas de coesão, devido a um processo de rotura por fadiga associada à repetição das extensões de tracção nelas instaladas, e na ocorrência de deformações permanentes (assentamentos)

na superfície do pavimento, traduzindo o adensamento das várias camadas e do solo de fundação, associado à repetição das extensões verticais de compressão nessas camadas (BRANCO *et al.*, 2005).

O dimensionamento do pavimento visa definir a sua composição (espessuras das camadas e materiais) de modo a evitar que, para o número de carregamentos previsto durante a vida do pavimento, as degradações não ultrapassem certos limites considerados aceitáveis.

Para o dimensionamento dos pavimentos rodoviários apenas é considerado o efeito do tráfego de veículos pesados. Para os pavimentos flexíveis e semi-rígidos consideram-se períodos de dimensionamento de 20 anos, enquanto para os pavimentos rígidos o período adoptado é de 30 anos (JAE, 1995).

Em seguida, caracterizam-se os diferentes tipos de pavimentos, quanto à sua composição e comportamento.

2.2. Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos rodoviários flexíveis são compostos por misturas betuminosas (geralmente betume asfáltico), nas camadas superficiais e seguidas inferiormente de uma ou duas camadas constituídas por materiais granulares, nas camadas de base (PEREIRA, 1995). O principal elemento estrutural é a camada de base, podendo esta também ser formada por misturas betuminosas, sendo designado o pavimento por semi-flexível (BATISTA, 2009).

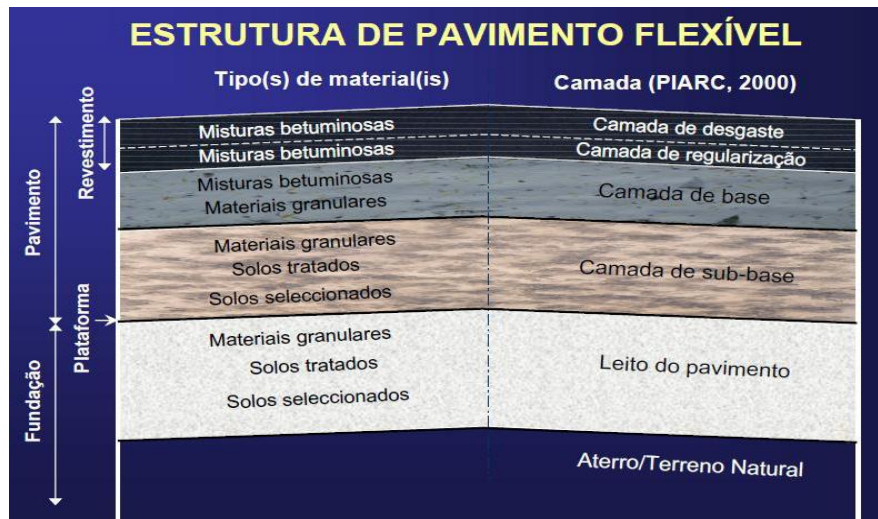


Figura 3. Pavimento Flexível (BATISTA, 2009).

A constituição de um pavimento flexível (Figura 3) depende da intensidade do tráfego, da resistência do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis, que por sua vez dependem das condições climáticas. Assim, quando o tráfego é pouco agressivo e se dispõe de materiais granulares de boa qualidade a custo favorável, podem ser projectados e construídos pavimentos onde é preponderante a componente granular. Em contrapartida, perante um tráfego intenso, numa região com reduzidos recursos quanto a materiais granulares de qualidade, e face a uma fundação de reduzida capacidade de suporte, será necessário considerar um pavimento integrando várias camadas betuminosas, com espessura total significativa (BRANCO *et al.*, 2005).

2.3. Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rodoviários rígidos são compostos por material granular estabilizado com ligantes hidráulicos (geralmente betão de cimento portland), na camada superior e na inferior, ou esta última pode ser constituída apenas por material granular (SILVA, 2009). O principal elemento estrutural é a camada de betão de cimento (Figura 4), que desempenha ao mesmo tempo a função de camada de desgaste (BATISTA, 2009).

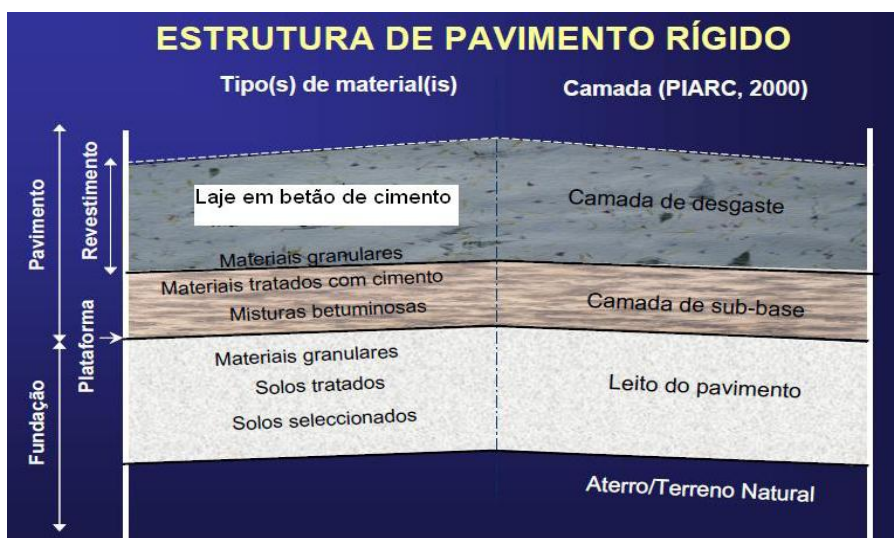


Figura 4. Pavimento Rígido (BATISTA, 2009).

As tensões verticais originadas pelas cargas são distribuídas sobre a grande área da laje de betão. Este tipo de pavimento apresenta elevada resistência à flexão, que se deve ao betão de cimento usado, fazendo assim com que não sofram deformações muito acentuadas, mesmo quando submetidos a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento, e a elevadas temperaturas.

Na laje de betão ocorre retracção do material à medida que decorre a presa e o endurecimento, sendo comum o aparecimento de fendas de retracção. Existem contudo várias soluções para contrariar o aparecimento destas fendas. Uma das soluções que é muito utilizada, é a realização de juntas em intervalos de poucos metros, dividindo as lajes em painéis, fazendo com que os esforços de tracção sejam assim reduzidos. As juntas são um elemento importante para o funcionamento deste tipo de pavimento e exigem cuidados especiais de realização e de conservação (BRANCO *et al.*, 2005).

2.4. Pavimentos Semi-rígidos

Os pavimentos semi-rígidos são compostos por misturas betuminosas, nas camadas superficiais e por materiais granulares estabilizados com material hidráulico (betão pobre) na camada de base, sendo este o principal elemento estrutural deste tipo de pavimento, podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base (Figura 5). Este tipo de pavimento, apresenta na sua composição características comuns aos dois tipos

de pavimentos mencionados anteriormente, nomeadamente os flexíveis e os rígidos (BRANCO *et al.*, 2005).

Os pavimentos semi-rígidos permitem uma superfície de circulação confortável, devido ao baixo nível de ruído resultante da interacção pneu/pavimento, e ainda limitam a formação de cavados de rodovia (deformações/assentamentos superficiais no pavimento).

A particularidade dos pavimentos semi-rígidos, quando comparados com outros tipos de pavimento, é a ocorrência de fissuras na camada de base. A presença destas fissuras causa uma concentração de tensões na zona inferior da camada betuminosa sobrejacente, sobretudo sob a acção do tráfego e sob a acção de variações térmicas, o que origina a iniciação de fissuras naquela zona. Seguindo-se a propagação das mesmas, desde a camada de base até à superfície do pavimento (QUARESMA, 1992).

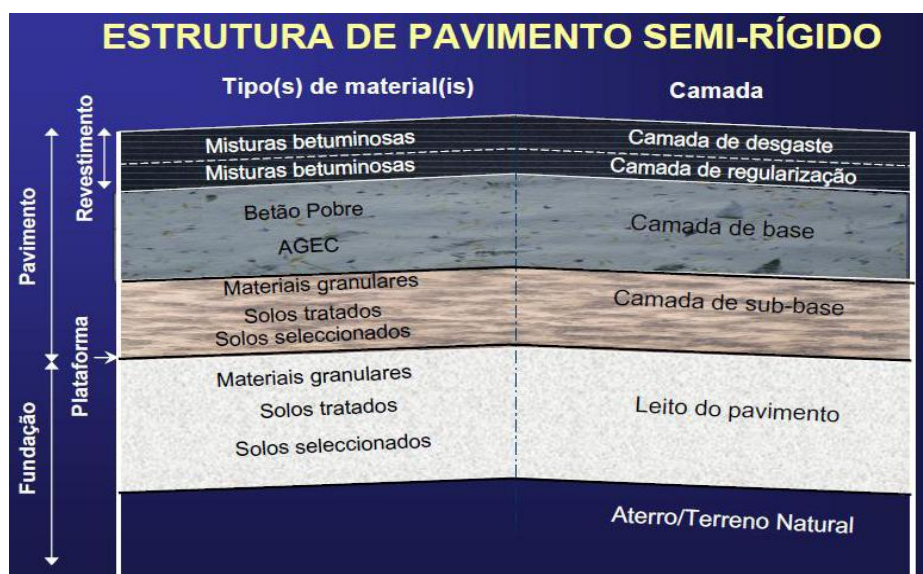


Figura 5. Pavimento Semi-rígido (BATISTA, 2009).

Uma das soluções adoptadas que permitem evitar a propagação das fendas provenientes da camada de betão pobre para as camadas betuminosas superficiais, denomina-se de ‘estrutura inversa’ (ver a Figura 6). O que diferencia a estrutura ‘inversa’ da estrutura ‘directa’ é a camada de base granular de granulometria extensa, que se coloca entre a camada de betão pobre e as camadas betuminosas superficiais.

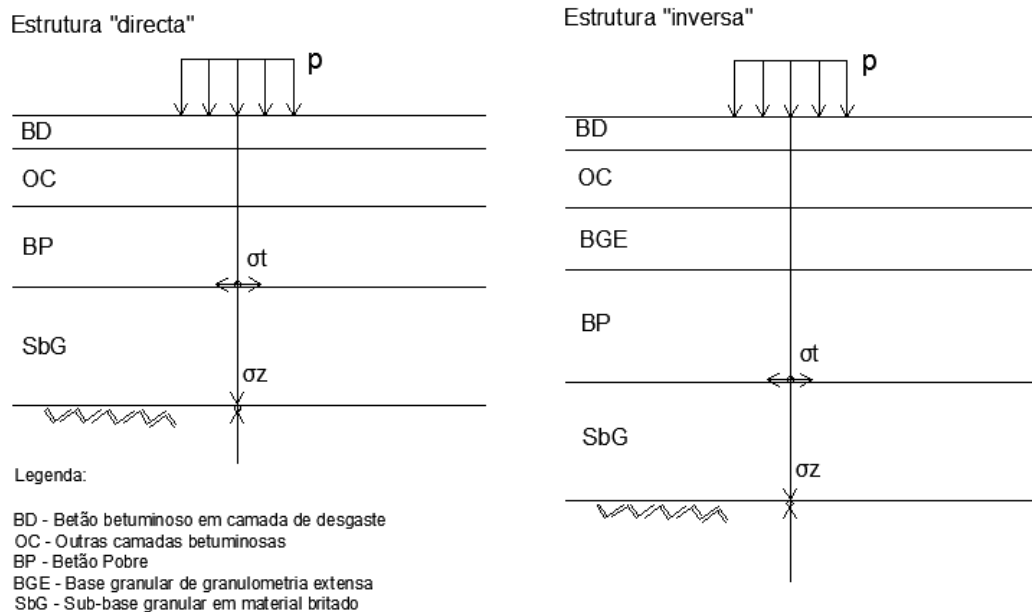


Figura 6. Pavimento Rodoviário Semi-rígido – estrutura “directa” e estrutura “inversa” (BRANCO *et al.*, 2005).

É a camada de base devido à sua elevada rigidez que absorve a maior parte dos esforços verticais e os transmite à fundação e ao solo em valores mais reduzidos. Em função das respectivas espessuras, as camadas betuminosas poderão ou não ter uma contribuição estrutural importante em alguns casos.

Na camada tratada com cimento desenvolvem-se fendas verticais devidas à retracção do betão. Este fendilhamento desenvolve-se transversalmente, com espaçamento na ordem dos 3 a 5 metros, passando a possuir juntas transversais abertas. Para além destas fendas, ocorre ainda naturalmente o fendilhamento por fadiga. As fendas oriundas desta camada, devido às passagens repetidas dos veículos, têm tendência a propagar-se as camadas betuminosas sobrejacentes, a menos que se utilizem disposições construtivas, tais como, geotêxteis impregnados de betume, finas camadas de argamassa betuminosa, que retardem ou contrariem essa propagação (BRANCO *et al.*, 2005).

3. DEGRADAÇÕES EM PAVIMENTOS

Neste capítulo são mencionados os factores que levam às degradações em pavimentos, fazendo-se referência a alguns estudos que foram efectuados nesta área.

3.1.Capacidade de Carga de um Pavimento

Um pavimento tem que garantir um dado nível de serviço, para que a circulação se dê em condições de conforto, comodidade e segurança.

Para que um pavimento desempenhe adequadamente as suas funções, deverá conter suficiente capacidade de carga. A capacidade de carga de um pavimento, como já foi referenciado anteriormente, define-se como uma característica do seu estado estrutural, ligada à sua capacidade para suportar as acções devidas ao tráfego futuro. Ou seja, a capacidade de carga de um pavimento, varia com o tempo e depende do tipo de utilização a que será submetido. Relacionando-se assim com o tráfego futuro, para um dado horizonte de projecto, podendo considerar-se que, determinada estrutura de pavimento tem capacidade de carga adequada para um determinado tipo de tráfego futuro, mas insuficiente, para outro tráfego mais agressivo (ANTUNES, 1993).

As características superficiais de um pavimento, após entrada em serviço, vão-se degradando com o tempo. As causas das degradações são abundantes, podendo-se apontar como alguns factores, os seguintes (QUARESMA, 1992):

- o aumento da intensidade do tráfego;
- as condições climáticas adversas;
- o dimensionamento do pavimento mal efectuado;
- a fraca resistência do solo de fundação;
- a inexistência da verificação da qualidade dos materiais, sua formulação, fabrico e colocação em obra;

- entre outros.

3.2.Principais Tipos de Degradação em Pavimentos Semi-rígidos

O aparecimento de deformações permanentes na superfície dos pavimentos flexíveis, tal como ilustra a Figura 7, resulta do somatório das deformações permanentes induzidas nas suas camadas e no solo de fundação, pela passagem repetida dos veículos, resultando posteriormente, no fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas (ANTUNES, 1993).

Os pavimentos semi-rígidos apresentam um comportamento muito distinto dos pavimentos flexíveis tradicionais. A rigidez da camada de base dos pavimentos semi-rígidos permite uma maior distribuição das cargas sobre a fundação, pelo que, em geral, os fenómenos de deformação permanente, traduzidos na formação de rodeiras (Figura 8), têm uma contribuição limitada para a redução do nível de serviço do pavimento, desde que as camadas betuminosas sejam adequadamente formuladas e executadas (QUARESMA, 1992).



Figura 7. Rodeira devido à baixa capacidade de carga de um pavimento flexível (REIS, 2009).

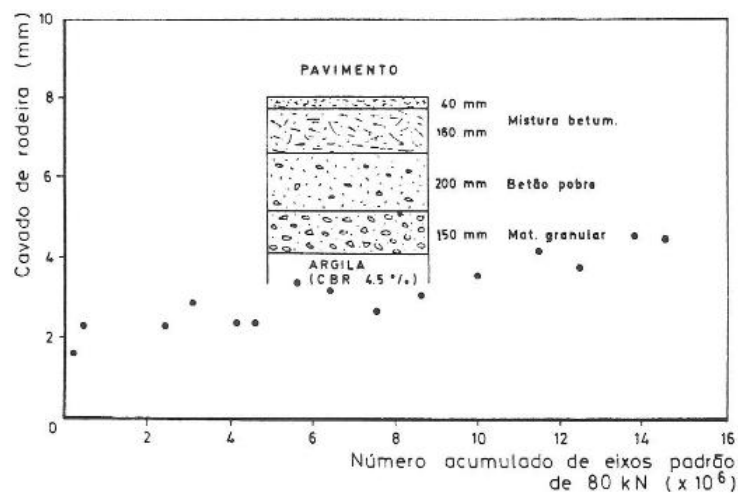


Figura 8. Evolução do cavado de rodeira com o tráfego, num pavimento semi-rígido (QUARESMA, 1992).

Algumas das degradações, podem resultar da natureza e qualidade dos materiais, e dos processos construtivos utilizados. Embora, uma grande parte dessas degradações, possam ocorrer como resultado de um dimensionamento inadequado e que não atribuem ao pavimento as características estruturais necessárias. A fissuração em pavimentos do tipo semi-rígido, tem sido uma preocupação comum a todos os intervenientes no projecto, construção e exploração das redes rodoviárias, daí que, importa destacar os aspectos específicos de degradação deste tipo de pavimento (QUARESMA, 1992).

Tabela 2. Principais tipos de degradação em pavimentos semi-rígidos (QUARESMA, 1992).

Tipo de Degradação	Causas	Exemplos de Manifestação
Fissuração	Eixos sobrecarregados	Fissuras longitudinais, transversais ou em pele de crocodilo
	Repetição de cargas	Fissuras longitudinais, transversais ou em pele de crocodilo
	Retracção	Fissuras, sobretudo transversais
	Variação de Temperatura	Fissuras, sobretudo transversais
	Insuficiente espessura da camada de base	Fissuras longitudinais, transversais ou em pele de crocodilo
	Insuficiente resistência à tracção da camada de base	Fissuras longitudinais, transversais ou em pele de crocodilo
	Má ligação das camadas betuminosas à camada de base por degradação superficial desta	Fissuras circulares, pele de crocodilo, bombagem de finos
	Má ligação das camadas betuminosas à camada de base por má aplicação do sistema de colagem	Fissuras em ondas, pele de crocodilo
	Má ligação entre duas camadas com ligante hidráulico	Fissuras longitudinais, transversais ou em pele de crocodilo
Deformação	Repetição das cargas	Assentamentos diferenciais no sentido transversal
	Misturas betuminosas com deficiente resistência à deformação permanente	Fluência lateral na zona das rodeiras ou, por vezes, na direcção de uma maior pendente
	Solos expansivos	Empolamento
	Má drenagem	Assentamentos localizados
	Esmagamento das partículas da mistura betuminosa contra a camada de base	Assentamentos diferenciais, sobretudo no sentido transversal
Falta de textura superficial	Formulação ou construção deficiente da camada de desgaste	Exsudação do betume
	Repetição de cargas	Polimento da superfície do pavimento

Desagregação	Este mecanismo surge, sobretudo, numa fase avançada de deterioração da superfície do pavimento, após manifestações do tipo das mencionadas mais acima. Pode também ocorrer nas faces das fissuras como resultado de deslocamentos verticais relativos entre essas faces.
--------------	--

Foi realizado um trabalho e publicado pelo TRRL (Transport Research Road Laboratory), por Mayhew, em 1986, onde se efectuou uma análise do comportamento de 90 secções em pavimento semi-rígido na Grã-Bretanha. Observou-se fendilhamento longitudinal, apenas em secções com espessura da camada de base inferior a 200 mm. Para espessuras superiores a 200 mm, apenas foi observado fendilhamento transversal. Retiraram-se conclusões importantes nesse estudo, tais como, que o fendilhamento longitudinal é um fenómeno ligado à rotura por fadiga, em tracção, da camada de base. Este fendilhamento apareceu nas secções com menores espessuras da camada de base, onde foi observado um aumento do fendilhamento longitudinal com o aumento do número acumulado de passagens de veículos pesados, como ilustra a Figura 9 (QUARESMA, 1992).

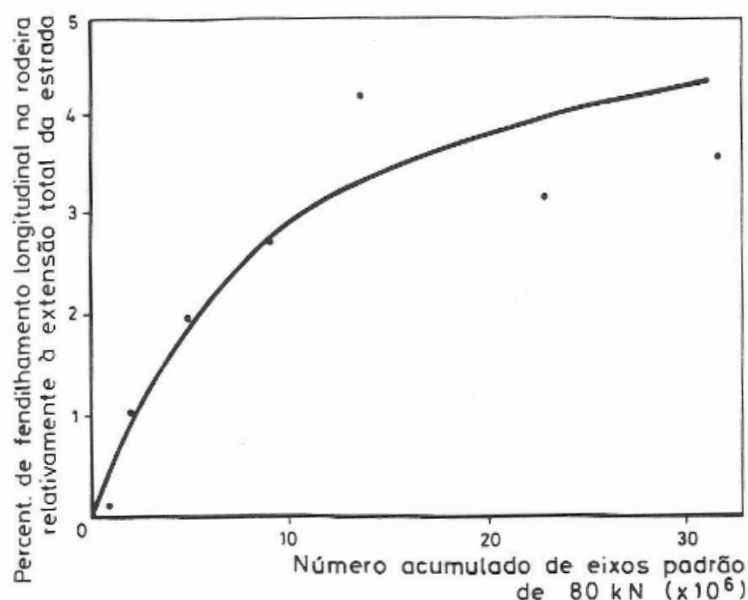


Figura 9. Evolução do fendilhamento longitudinal num pavimento semi-rígido com o tráfego (QUARESMA, 1992).

O aparecimento de fissuras longitudinais resultantes da fadiga da camada de base é acompanhado geralmente pela formação de rodeiras. O cavado de rodeiras evolui lentamente até cerca de 10 mm, após o que geralmente aumenta de uma forma mais acelerada (QUARESMA, 1992).

Mayhew e Potter em 1986, referiram que cerca de metade das secções de pavimento observadas não exibiram fendilhamento transversal, e que em apenas 5% as fissuras estavam espaçadas menos de 10 m. Verificaram também, que o fendilhamento transversal à superfície dos pavimentos observados, aumentava até cerca de 20% do tráfego de projecto, tendo um espaçamento médio de cerca de 20 m. Não verificaram posteriormente uma evolução significativa desse fendilhamento, pelo que não lhes foi possível prever a vida restante de um pavimento através do espaçamento das fissuras transversais. Concluíram assim, que o fendilhamento transversal à superfície, aumentou significativamente quando a camada de desgaste tinha cerca de 7 anos e secções onde a espessura das camadas betuminosas era inferior a 185 mm (QUARESMA, 1992).

A experiência francesa relativamente ao fendilhamento transversal em pavimentos semi-rígidos, indica que, após uma fase inicial em que o espaçamento entre fissuras decresce rapidamente, se constata que a evolução é mais lenta, com um valor limite, dependente do material da camada de base, variando entre 3 a 10 metros, como se pode observar na Figura 10.

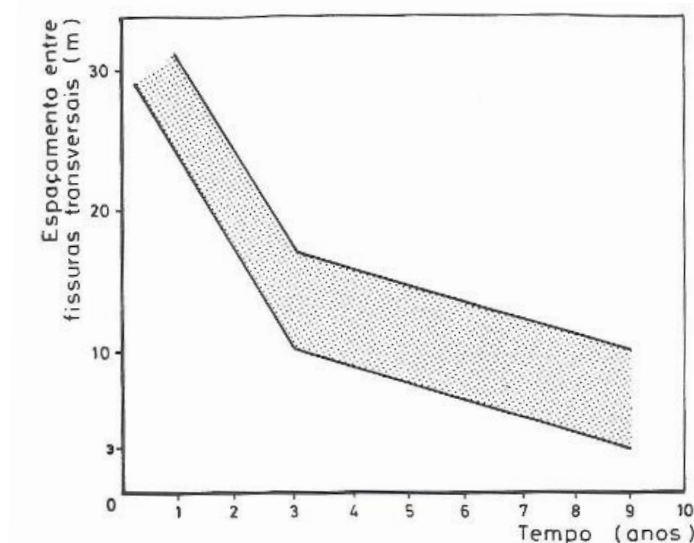


Figura 10. Espaçamento entre fissuras transversais ao longo do tempo (QUARESMA, 1992).

De um modo geral, pode afirmar-se que o fendilhamento transversal à superfície resulta da propagação das fissuras resultantes de contracção térmica e higrométrica, que existem na camada de base. Fendilhamento que é prejudicial, pois para além de influir por si só no estado de tensão instalado no pavimento e na respectiva fundação, permite a entrada de água para o interior do pavimento. No entanto, desde que seladas, estas fissuras não são mais graves que as fissuras resultantes da rotura por fadiga em tracção das camadas de base (QUARESMA, 1992).

A selagem de fendas apresenta um aspecto inestético aos pavimentos semi-rígidos, e em alguns países não é aceite em pavimentos recentemente construídos, o que constitui um impedimento à expansão dos pavimentos semi-rígidos.

Desta forma, têm vindo a ser realizados estudos em diversos países, que visam a procura de soluções para controlar o fenómeno de propagação de fissuras. De referir o projecto ECOPAVE, realizado por um consórcio Anglo-Dinamarquês e financiado pela Comissão Europeia do programa BRITE/EURAM. De salientar ainda, a Conferência Internacional RILEM em 1989, sobre os problemas relacionados com a caracterização e os processos de controlo da propagação de fissuras em pavimentos. E com algum destaque neste âmbito, encontra-se a construção de pavimentos do tipo semi-rígido em

Portugal em diversos trechos piloto, no lanço Celorico da Beira/Guarda, no antigo troço da IP5, actual A25. Onde foram ensaiados diversos materiais e técnicas construtivas, visando controlar a propagação de fissuras da camada de base até à superfície, estudo que foi realizado pela JAE e controlado pelo LNEC (QUARESMA, 1992).

É contudo possível limitar as degradações ao efectuar o dimensionamento de pavimentos semi-rígidos, a níveis compatíveis com as condições de serviço pretendidas e durante a vida de projecto. Mas não é possível evitar que o pavimento se degrade, podendo ser sujeito a variadas intervenções de manutenção e conservação de modo a prolongar a sua vida.

Sabe-se que a ruína de um pavimento, resulta de um acumular de diversas degradações, que se manifestam ao longo do tempo à superfície. E que a deterioração das características superficiais (textura e regularidade) afecta as condições de serviço que o pavimento deve assegurar, ou seja, a sua capacidade de garantir que a circulação se processe em condições de segurança, economia e conforto (QUARESMA, 1992). Sendo assim, a qualidade dos pavimentos rodoviários é um parâmetro fundamental na gestão de um sistema rodoviário melhorado. Para as actividades de construção e manutenção, é função da avaliação de pavimentos, avaliar e medir os seguintes parâmetros (JACINTO, 2003), de modo a:

- fornecer dados para validar opções de projecto e actualiza-los se necessário;
- reprogramar medidas de reabilitação com base nessa actualização;
- fornecer dados para uma melhoria dos métodos de dimensionamento;
- fornecer dados para uma melhoria das técnicas de construção e manutenção;
- fornecer informações para actualização de software de gestão de pavimentos;

3.3. Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos com o Deflectómetro de Impacto

A auscultação dos pavimentos rodoviários tornou-se importante para efectuar a manutenção adequada dos mesmos. As características dos pavimentos rodoviários degradados, que são alvo de avaliação são: a capacidade de carga, a irregularidade, a

drenabilidade, o ruído, o atrito e a textura. Para avaliar estas características recorre-se geralmente e cada vez mais a equipamentos de auscultação (ALVES, 2007).

O pavimento apresenta características de elevada resistência e baixa deformabilidade, assim como permeabilidade e aderência adequadas à circulação dos veículos. Atendendo sempre a determinados parâmetros, tais como, a intensidade do tráfego, o tipo de tráfego, a velocidade máxima permitida e o tipo de clima predominante no local onde se encontra a estrada. Assim se obtém um bom dimensionamento de um pavimento rodoviário, para que este possa dar a melhor resposta às solicitações resultantes da aplicação das cargas por parte dos veículos e da acção dos agentes climáticos (ALVES, 2007).

O Deflectómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer – FWD*) é um equipamento destinado a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento, através da medição da sua resposta a uma carga vertical de impacto (ver Figura 11). Este equipamento permite a realização de ensaios não destrutivos simulando as acções induzidas pela passagem dos veículos (60-80 km/h), e mede a resposta do pavimento daí resultante relativamente às deflexões (ALVES, 2007).



Figura 11. Deflectómetro de Impacto (ALVES, 2007).

O Deflectómetro de Impacto é geralmente atrelado a um veículo e posicionado no ponto de ensaio, sendo por isso um ensaio estacionário. Posteriormente a placa de ensaio é encostada à superfície do pavimento e a massa é elevada à altura pretendida. A

aquisição de resultados é efectuada num computador a bordo do veículo rebocador. O diâmetro da placa de ensaio varia de 30 cm a 45 cm, de acordo com a norma ASTM D4694-96. A placa de 30 cm de diâmetro é normalmente utilizada em pavimentos rodoviários, enquanto a placa de 45 cm é mais utilizada em pavimentos aeroportuários (ALVES, 2007).

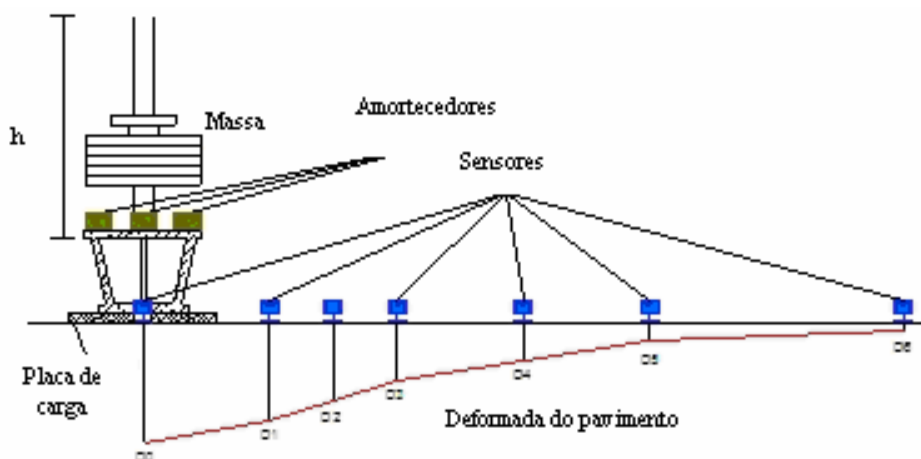


Figura 12. Princípio de ensaio do Deflectómetro de Impacto (ALVES, 2007).

Os transdutores utilizados para determinar a deflexão nos ensaios com este equipamento são transdutores de inércia, que medem o deslocamento a partir de uma massa de referência ligada à parte exterior do transdutor. Há três tipos de transdutores: sismómetros (transdutores de deslocamentos absolutos), geofones (transdutores de velocidade) e acelerómetros (ALVES, 2007).

A medição da temperatura de ensaio é um parâmetro muito importante, essencialmente, na avaliação de pavimentos flexíveis, já que quanto menor for a temperatura, menores serão as deflexões registadas. Para se proceder a uma correcta interpretação dos resultados para a análise do comportamento do pavimento, é necessário o conhecimento do valor da temperatura de ensaio. Visto que a força aplicada em cada ponto de ensaio não corresponde exactamente à força pretendida, é necessário proceder a uma normalização dos valores de deflexões para a força pretendida (ALVES, 2007).

Com a utilização deste equipamento é possível avaliar as condições de fundação, das camadas de base e sub-base (em fase de construção) e determinar o comportamento estrutural do pavimento, nomeadamente os módulos de deformabilidade das várias

camadas que o constituem, permitindo efectuar estudos de conformidade com determinado projecto e de possíveis reforços a efectuar no local.

Os resultados obtidos pelos ensaios efectuados com o Deflectómetro de Impacto são bastante fiáveis, e os próprios ensaios são efectuados rapidamente e com elevado rendimento, tendo em conta a condição estacionária, embora a carga aplicada seja dinâmica.

As cargas de impacto aplicadas podem atingir 250 kN dependendo do Deflectómetro de Impacto. As maiores cargas dizem respeito a equipamentos *Heavy Weight Deflectometer*, que podem ser utilizados em pavimentos rodoviários e em pavimentos aeroportuários (ALVES, 2007).

A avaliação estrutural de um pavimento pode ser efectuada segundo métodos destrutivos e métodos não destrutivos. Os métodos não destrutivos correspondem a ensaios de carga que se podem separar em dois grupos principais, conforme o modo como estas cargas são aplicadas:

- **Carga Rolante** – diz respeito aos equipamentos em que a carga é induzida pela passagem de um eixo de um veículo pesado, sendo a medição das deflexões, usualmente, efectuada num determinado ponto. Deste grupo fazem parte equipamentos como a Viga *Benkelman*, o Deflectógrafo de pavimentos do LNEC, o Deflectógrafo *Lacroix* e o Curvîmetro;
- **Carga Pontual** – é relativa a equipamentos em que a carga é aplicada num dado ponto da superfície do pavimento, quer seja por cargas dinâmicas ou estáticas. Os equipamentos com aplicação de cargas dinâmicas são normalmente os mais utilizados. São de referir equipamentos como o Deflectómetro de Impacto e o *High Speed Deflectometer* que induzem cargas de impacto (a partir de queda de uma massa) e equipamentos como o *Dynaflect*, entre outros, que aplicam solicitações sinusoidais na superfície dos pavimentos. A aplicação de carga estática é utilizada muito raramente (ANTUNES, 1993).

Os equipamentos desenvolvidos permitem simular a passagem do tráfego, nomeadamente as solicitações de carga no pavimento, com vista a determinar a sua conformidade com o projecto na fase de construção, e o estudo de reforços a aplicar, caso se verifique a não conformidade do pavimento face às solicitações durante a fase de serviço (ANTUNES, 1993).

Relativamente a métodos destrutivos, podem ser efectuadas sondagens com o objectivo de determinar a constituição dos pavimentos e características das camadas constituintes e características dos materiais.

As sondagens em pavimentos rodoviários são efectuadas com o principal intuito de apoiar o estudo dos pavimentos recorrendo a equipamentos de auscultação como o Deflectómetro de Impacto, o Radar de Prospeção, entre outros. As sondagens são ensaios de caracterização complementar que permitem ter conhecimento sobre a espessura das camadas e as características dos materiais constituintes, efectuando para tal ensaios de laboratório.

As sondagens podem ser efectuadas por rotação (Figura 13), em que são retirados tarolos cilíndricos (opção de escolha do diâmetro dos tarolos pretendido) e por abertura de poços, preferencialmente junto à berma de modo a evitar perturbação e destruição nas vias de tráfego.



Figura 13. Execução de sondagem à rotação (à esquerda) e tarolos retirados de um pavimento flexível (à direita) (ALVES, 2007).

A grande vantagem da abertura de poços, em relação à execução de sondagens por rotação, é que em relação a estas últimas apenas são extraídas amostras das camadas ligadas (misturas betuminosas, por exemplo), enquanto nos poços é possível identificar as espessuras, recolher amostras dos materiais presentes nas restantes camadas não ligadas (camadas granulares), e ter uma perspectiva visual de cada camada e do conjunto de todas.

No entanto, a execução de poços (Figura 14) é um método que apresenta um baixo rendimento e é executada muito pontualmente precisamente por ser um processo moroso, além de ser mais destrutivo do que as sondagens à rotação.



Figura 14. Sondagem por abertura de poço (ALVES, 2007).

Muitas vezes, a execução de sondagens permite determinar a natureza da propagação de fendas, ou seja, se estas têm origem à superfície ou se foram propagadas de baixo para cima (ALVES, 2007).

4. REFLEXÃO DE FENDAS EM PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS

Apresenta-se neste capítulo a base teórica do presente estudo sobre o processo de reflexão de fendas em pavimento do tipo semi-rígido.

4.1. Camada de Base de um Pavimento Semi-rígido

Em Portugal, tem-se vindo a assistir nos últimos anos, a um aumento crescente ao nível rodoviário, quer no número de veículos em circulação, quer nas respectivas cargas por eixo. Tornou-se necessário executar estruturas recorrendo por vezes à realização de uma camada em mistura com ligante hidráulico, camada que desempenha um papel importante no comportamento estrutural do pavimento. Sobrepondo-lhe uma ou mais camadas betuminosas, designando-se esta solução de pavimento semi-rígido, como já foi referido anteriormente. Usualmente é utilizada uma dosagem de cimento de 90 a 110 kg/m³ (JAE, 1995) na camada de base de um pavimento semi-rígido, designando essa mistura por **betão pobre**.

Desde sempre foram tidos em conta os cuidados necessários, quer ao nível de formulação, fabrico e colocação em obra, quer no controlo de qualidade do material empregue nessa camada. Pois sabe-se que a existência de fissuras na camada de base se traduz geralmente numa redução da capacidade de distribuição das cargas entre as faces das fissuras, o que irá provocar uma propagação dessas fissuras às camadas superiores do pavimento. Tornando-se numa problemática ao nível estrutural do pavimento.

4.2. Propagação de Fissuras

Segundo Luís Quaresma (1992), a camada de base do pavimento semi-rígido tende a fissurar. Estas fissuras são geralmente transversais, por retracção de origem termo-

higrométrica. A presença de fissuras ou de eventuais juntas de construção nesta camada, causa uma concentração de tensões na zona inferior da camada betuminosa subjacente, sobretudo sob a acção do tráfego ou sob a acção de variações térmicas, o que irá privilegiar a formação de fissuras nessa zona. Seguindo-se a propagação das mesmas desde a camada de base até à superfície do pavimento (ver Figura 15).

Este problema é extensível aos casos dos reforços de pavimentos rígidos ou até mesmo a pavimentos flexíveis fissurados. Contudo, deverá ter-se em conta este mecanismo de degradação nos métodos de dimensionamento existentes.

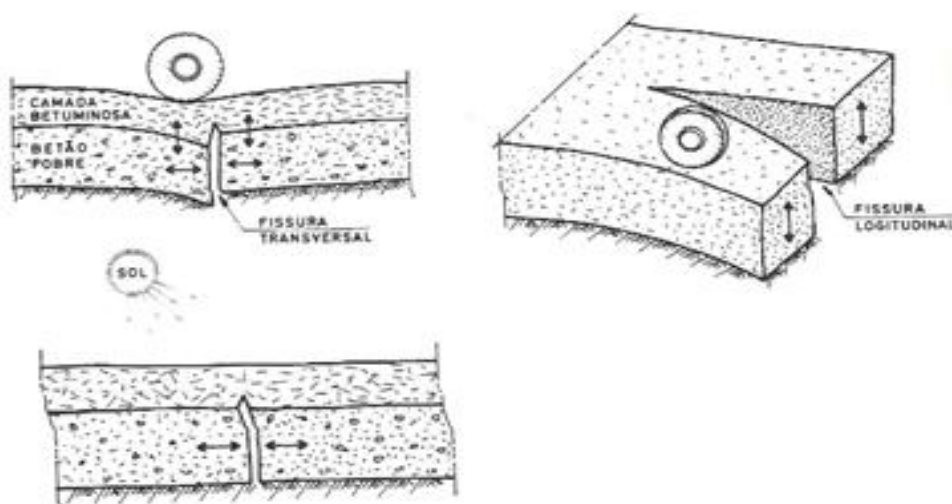


Figura 15. Propagação de fissuras sob a acção dos rodados ou sob acções térmicas (QUARESMA, 1992).

A propagação de uma fissura até à superfície afecta a resistência e a durabilidade do pavimento, apontam-se de seguida as consequências desfavoráveis:

- Perda de impermeabilidade da superfície do pavimento, permitindo a infiltração da água pluvial para o interior do pavimento, podendo atingir o solo de fundação, situação que se revela problemática ao nível da instabilidade do pavimento;

- Menor repartição das tensões no solo de fundação, devidas aos rodados dos veículos, levando ao aumento do nível de tensão aí instalado, na zona das fissuras;
- Aumento dos esforços nos bordos das lajes, constituídas pela parte das camadas de base do pavimento compreendida entre fissuras, sob acção do tráfego;
- Degradação da camada de desgaste junto da fissura, sob a acção combinada (dos veículos, da água, do gelo, entre outras), com a degradação local da camada e o destacamento de pequenos blocos (pele de crocodilo).

Torna-se assim importante controlar o fenómeno de iniciação e propagação das fissuras. Pois a reflexão de fendas pode ser um grande problema por encurtar o tempo de vida útil da nova camada. Nas Figuras 16 e 17, são apresentados exemplos de reflexão de fendas transversais e longitudinais respectivamente.



Figura 16. Reflexão de fendas transversal (REIS, 2009).



Figura 17. Reflexão de fendas longitudinal (REIS, 2009).

A Mecânica da Fractura revela ser um estudo importante, na medida em que através das concentrações de tensões e deformações que ocorrem, torna-se possível prever a rotura.

4.2.1. Mecânica da Fractura

A Mecânica da Fractura estuda o campo de tensões e deformações que ocorre num corpo que contém imperfeições, na proximidade das quais ocorrem importantes concentrações de tensão, que determinam a rotura, mais cedo do que a estrutura ordenada do material deixaria prever.

A presença de uma imperfeição, como a presença de pequenas fissuras, descontinuidades ou falta de material em determinadas regiões de um corpo, pode conduzir, após a propagação de uma fissura a partir desse defeito, a uma rotura mais ou menos brusca (QUARESMA, 1992).

Segundo o esquema clássico da Mecânica da Fractura (Irwin, 1960), é possível descrever os deslocamentos relativos das faces de uma fissura, através dos seguintes modos (Figura 18):

Modo I – corresponde a um deslocamento normal ao plano da fissura;

Modo II – corresponde a um deslizamento no plano da fissura, na direcção longitudinal;

Modo III – corresponde a um deslizamento no plano da fissura, na direcção transversal.

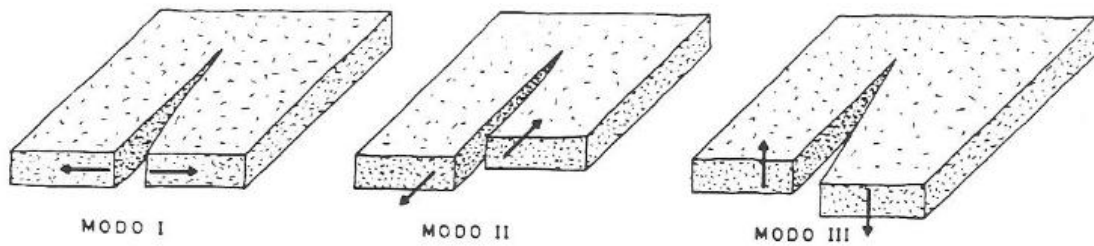


Figura 18. Deslocamentos relativos das faces de uma fissura (QUARESMA, 1992).

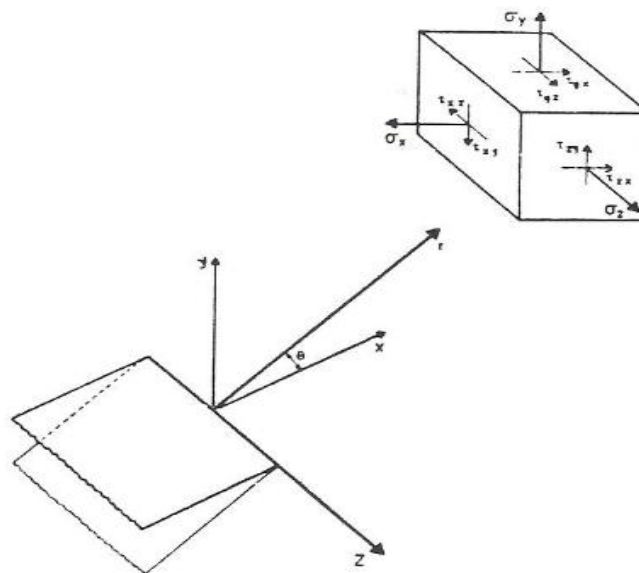


Figura 19. Estado de tensão na extremidade de uma fissura (QUARESMA, 1992).

A propagação de fissuras num pavimento semi-rígido resulta de deslocamentos relativos, horizontais e verticais, induzidos pelas acções térmicas e higrométricas, bem como pela passagem dos rodados dos veículos. As variações térmicas geram deslocamentos das faces da fissura segundo o modo I. A circulação de um veículo na proximidade de uma fissura pode ocasionar deslocamentos dos tipos I, II ou III. Sendo assim:

- ❖ Um veículo aproximando-se de uma fissura transversal originará, duma forma geral, deslocamentos do tipo I e II. Quando o eixo se encontrar centrado sobre a fissura, os deslocamentos serão apenas do tipo I;
- ❖ Um veículo a circular centrado sobre uma fissura longitudinal origina deslocamentos do tipo I;
- ❖ Um veículo a circular imediatamente ao lado de uma fissura longitudinal origina deslocamentos do tipo II. Ao atingir o final da fissura o veículo origina deslocamentos do tipo III.

Podem ocorrer simultaneamente vários modos de deformação. Podendo afirmar-se que a ocorrência do modo III é rara, pelo que a rotura deverá ocorrer pela combinação dos modos I e II. Importa assim, dispor de critérios que permitam prever a propagação de fissuras nesta situação de possibilidade de ocorrência dos vários modos de deformação.

4.2.2. Resistência à Rotura

Através da acção do tráfego e das variações de temperatura nos pavimentos semi-rígidos, ocorrem tensões elevadas na zona inferior das camadas betuminosas, junto das fissuras da camada de base. Esta concentração de tensões pode levar a uma iniciação de fissuras nas camadas betuminosas, em geral na continuação das existentes nas camadas de base. A seguir à iniciação das fissuras segue-se uma fase de propagação das mesmas através da espessura das camadas betuminosas, podendo-se admitir que o aumento do comprimento a das fissuras por ciclo de carregamento é expresso, em função da variação do factor de intensidade de tensão durante o ciclo ΔK , relação esta que se designa por **lei de Paris**.

Esta fase de aumento controlado do comprimento das fissuras prossegue até ser atingido um comprimento crítico a partir do qual se dá a rotura da camada, situação em que a fissura atinge a superfície (ALMEIDA, 2008, QUARESMA, 1992).

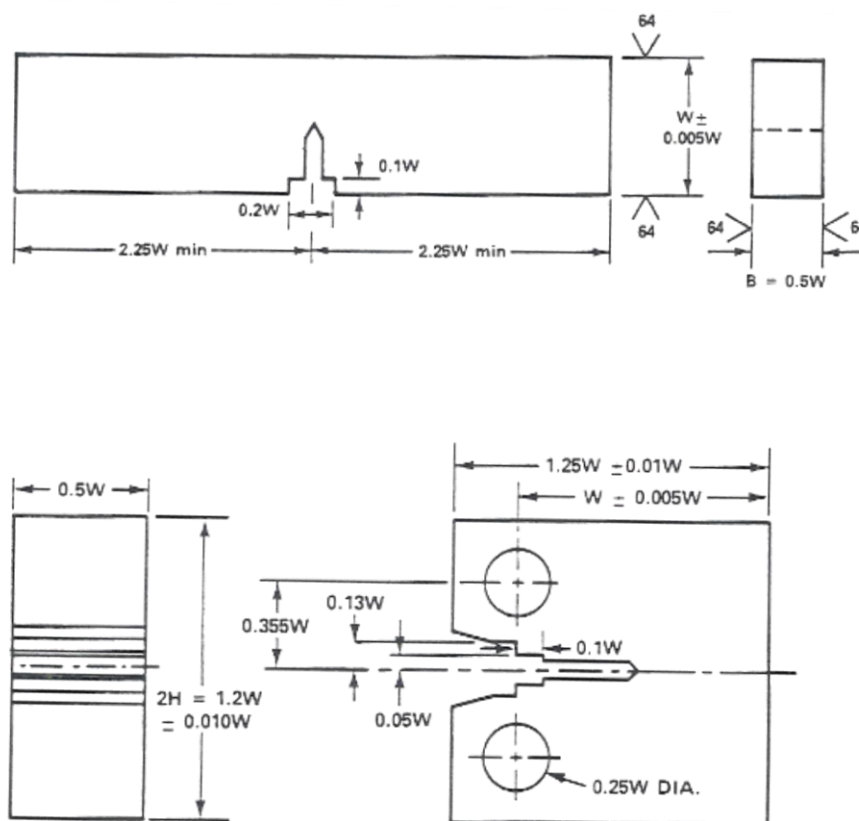


Figura 20. Ensaios para caracterização da propagação de fissuras (QUARESMA, 1992).

Seguidamente noutra fase dá-se um período de propagação das fissuras. Os parâmetros da lei de Paris podem ser determinados em ensaios laboratoriais, através dos quais se utilizam geralmente montagens em que a geometria dos provetes e das cargas aplicadas permitem uma fácil avaliação de intensidade de tensão.

Uma das montagens mais utilizadas consiste em realizar ensaios de flexão em que são realizados entalhes a meio vão na parte inferior das vigas ensaiadas, tal como ilustra a Figura 20. Nessa mesma figura, esquematiza-se o provete utilizado no designado *Compact Tension Test*. Ambos os ensaios encontram-se normalizados pela ASTM. Nestes ensaios é medida a variação do comprimento da fissura ao longo dos vários ciclos de carregamento, sendo o factor de intensidade de tensão obtido analiticamente em função da carga e do comprimento da fissura (QUARESMA, 1992).

A medição do comprimento da fissura durante a realização de um ensaio é uma tarefa delicada. Foram propostas diversas técnicas, podendo citar-se, a título de exemplo a mera inspecção visual, ou de uma forma mais precisa, a propagação de ultra-sons,

transdutores piezo-eléctricos, a colagem de uma grelha metálica na face do provete, medindo-se a evolução da resistência eléctrica da grelha no decorrer do ensaio, ou ainda recorrendo a espectroscopia de infra-vermelhos. Como o custo destas técnicas era elevado, o comprimento da fissura passou a ser determinado de forma indirecta, através da medição da abertura da fissura no *Compact Tension Test* ou o deslocamento do ponto de aplicação da carga nos ensaios de flexão (QUARESMA, 1992).

Merecem ainda referência alguns ensaios que permitem a utilização de provetes cilíndricos, uma vez que estes podem ser facilmente extraídos de um pavimento já existente (Figura 21).

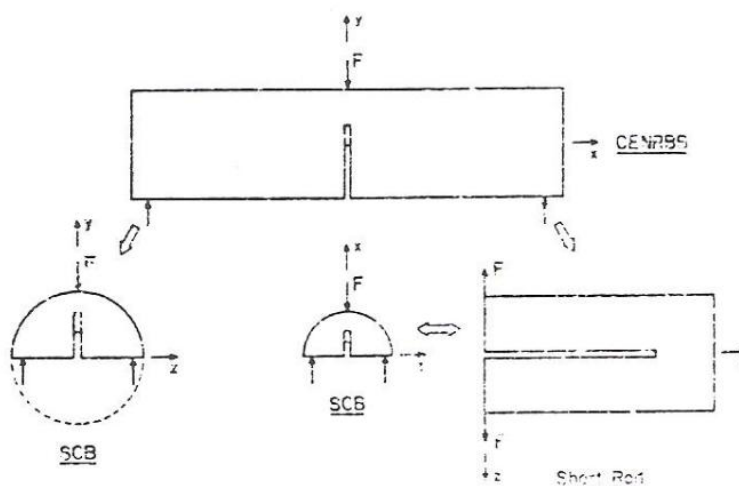


Figura 21. Ensaios para caracterização da propagação de fissuras utilizando provetes cilíndricos (QUARESMA, 1992).

Foram realizados alguns trabalhos na área da propagação de fissuras em pavimentos recorrendo a montagens, na procura de simular a uma escala reduzida a geometria deste problema. Utilizou-se este tipo de montagens quer no estudo da acção dos rodados, quer de variações de temperatura.

Na Figura 22 mostra-se a título de exemplo, a montagem realizada no Centre de Recherches Routières, na Bélgica, que pretendeu simular a propagação de fissuras resultante de variações térmicas.

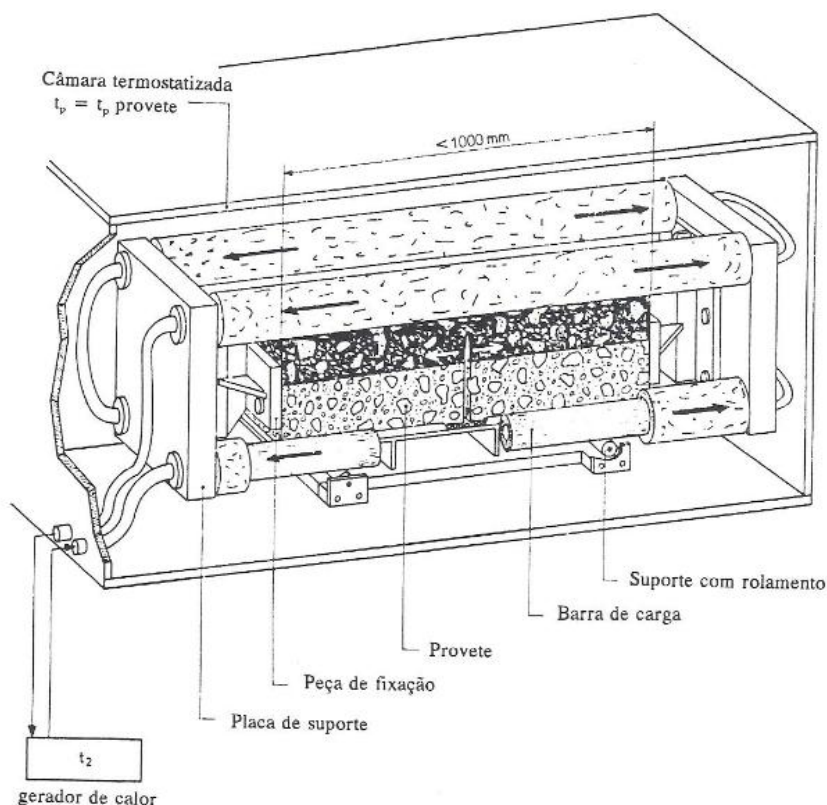


Figura 22. Montagem para simulação da propagação de fissuras sob variações de temperatura (QUARESMA, 1992).

A Figura 23 ilustra um equipamento existente na Universidade de Nottingham, no Reino Unido, para simulação da acção dos rodados. Equipamento do mesmo tipo foi utilizado noutros países na década de 90, como por exemplo, em França e nos Estados Unidos (QUARESMA, 1992).

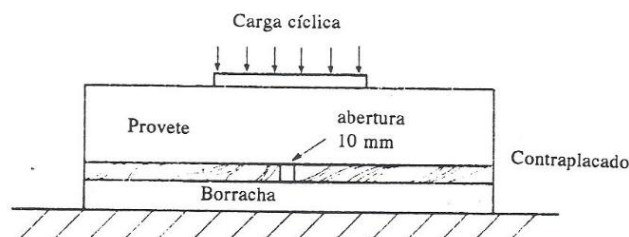


Figura 23. Montagem para simulação da propagação de fissuras sob a acção dos rodados dos veículos (QUARESMA, 1992).

Os resultados obtidos neste tipo de ensaios, permitiram na década de 90, comparar para uma dada carga ou para uma dada amplitude do movimento de abertura/fecho de fissuras, a eficiência de diversas soluções visando controlar a propagação de fissuras.

Actualmente e como se poderá verificar mais à frente, no capítulo 5, recorrem-se a programas, como é o caso do SAP2000® que permitem modelar pavimentos fendilhados e analisar numericamente este género de informações.

4.3.Soluções para Controlar a Propagação de Fendas

O principal inconveniente apontado aos pavimentos semi-rígidos é o facto de as fendas geradas na camada de base se propagarem, através das camadas betuminosas, até à superfície do pavimento. Assim, podem ser implementadas várias soluções para minimizar a possibilidade de ocorrência deste fenómeno. As soluções são as seguintes [(QUARESMA, 1992), (L. QUARESMA *et al.*, 2002), (BRANCO *et al.*, 2005) e (REIS, 2009)]:

- Interposição de penetração betuminosa;
- Interposição de uma camada granular com agregado recomposto em central, entre as camadas superiores e a camada de base, designado por pavimento inverso;
- Aplicação de geotêxteis (tecidos e não tecidos), impregnados de betume, entre a camada de base e as camadas superiores betuminosas;
- Finas camadas de argamassa betuminosa;
- Aplicação de geogrelhas como solução de reforço;
- Utilização de cinzas volantes na camada de base, que limita o prejudicial efeito das fissuras resultantes da contracção sob variações térmicas e higrométricas, embora não as elimine, ajuda a controlar o aumento destas.

Em Portugal foi efectuado um estudo no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) pelo investigador Luís Quaresma em 1992, em que durante cerca de dez anos, se

observaram e discutiram resultados sobre o fendilhamento de pavimentos no lanço Celorico da Beira/Guarda, onde se integrava na altura o Itinerário Principal nº5. Foram construídos diversos trechos com diferentes soluções em pavimento semi-rígido, visando limitar a propagação de fissuras desde a camada de base até à superfície do pavimento [(QUARESMA, 1992) e (L. QUARESMA *et al.*, 2002)].

No âmbito dos estudos relativos a pavimentos semi-rígidos, o LNEC desenvolveu diversas acções visando aumentar os conhecimentos relativos ao comportamento deste tipo de pavimento, quer no que respeita à concepção e ao dimensionamento dos pavimentos, quer no domínio dos materiais e processos construtivos a utilizar.

A estrada entrou em serviço no final de 1989. Durante o ano de 1990 foram realizados ensaios de carga com pneu e só a partir de 1991 foi observada a evolução no tempo dos comportamentos estruturais e funcionais dos pavimentos, com particular atenção para a detecção das principais degradações, tendo sido publicados os resultados obtidos a cada dois anos, até ao ano 2000 (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Os resultados de contagens de tráfego realizados no IP5 apontavam para, no conjunto dos dois sentidos de circulação, o tráfego médio diário de veículos pesados, no lanço em estudo, ser de cerca de 1300 veículos aquando da abertura ao tráfego (no final de 1989) e, em 1999, de cerca de 2500, o que corresponde a uma taxa anual de crescimento dos veículos pesados de cerca de 7%. A percentagem de veículos pesados era elevada, apresentando valores entre 20% a 30% do tráfego de veículos motorizados (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

O pavimento semi-rígido projectado foi constituído por:

- Camada de desgaste em betão betuminoso, com 0,05 m de espessura;
- Camada de ligação em mistura betuminosa densa, com 0,07 m de espessura;
- Camada de base em betão pobre com 0,25 m de espessura;
- Camada de sub-base em material granular britado com 0,15 m de espessura.

Nas camadas betuminosas utilizou-se um betume 60/70 e o betão pobre, com agregado recomposto em central, de granulometria 0/37,5 mm, com uma resistência média e

tração em compressão diametral, aos 28 dias, de 1,2 MPa. As técnicas utilizadas para obter uma boa ligação entre a camada de base e a camada de mistura betuminosa densa mostraram-se eficazes.

Visto que o principal inconveniente apontado às estruturas semi-rígidas é o facto de as fendas geradas na camada de base se propaguem, através das camadas betuminosas, até à superfície do pavimento, foram implementadas diversas soluções para reduzir a possibilidade de ocorrência daquele fenómeno. As soluções utilizadas, foram as seguintes:

- i) Interposição de penetração betuminosa, com granulometria 40/65 m e 0,08 m de espessura. O ligante utilizado na penetração foi um betume 60/70, aplicado a uma taxa de 7 kg/m²;
- ii) Interposição de uma camada granular (pavimento inverso) com um agregado recomposto em central, de granulometria 0/37,5 mm num trecho e 0/20 mm noutro trecho, tendo a camada uma espessura de 0,15 m;
- iii) Interposição de uma argamassa betuminosa com um agregado com dimensão máxima de 5 mm. O ligante utilizado foi um betume modificado pela adição de um polímero do tipo SBS, sendo o teor em betume de 7%;
- iv) Interposição de um geotextil após aplicação de uma rega com emulsão betuminosa do tipo ECR, a uma taxa de 1kg/m² (foram empregues 7 tipos de geotexteis, tecidos e não tecidos, e, dentro destes últimos, agulhados mecanicamente e termosoldados);
- v) Indução ordenada de fissuras na camada de base, com um espaçamento de 5 m a 15 m, sendo, num dos trechos, colocada uma tira de geotextil, com cerca de 0,30 m de largura, sobre algumas destas fissuras.

Foi ainda executado um trecho em pavimento flexível. Dado que se podem considerar semelhantes as condições de tráfego e climáticas ao longo do traçado onde se inseriram as secções piloto, o estudo permitiu assim uma avaliação do comportamento das estruturas de pavimento flexível e semi-rígido e, dentro desta última, uma comparação da eficiência de técnicas visando limitar a propagação de fissuras. Nas Tabelas 3 e 4

resumem-se as estruturas realizadas e o seu custo relativo (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Tabela 3. Estruturas de pavimento realizadas no lanço Celorico da Beira/Guarda (IP5)
(L. QUARESMA *et al.*, 2002).

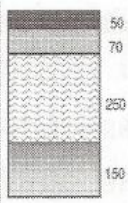
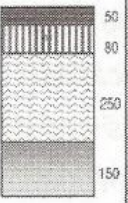
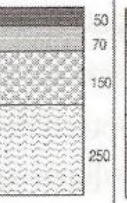
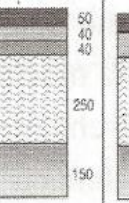
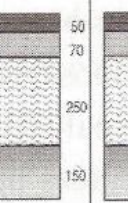
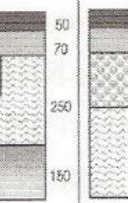
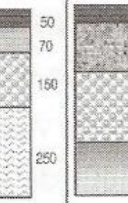

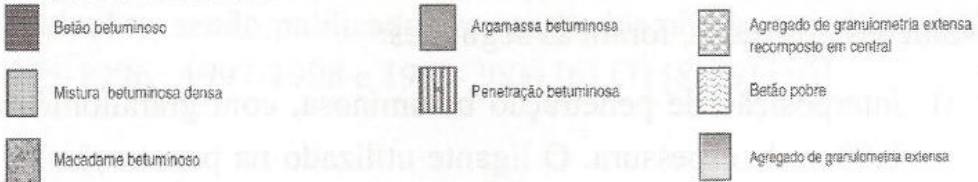
Tipo	Semi-rígido de referência	Penetração betuminosa	Inverso 0/37,5mm	Argamassa betuminosa	Geotextil impregnado	Indução de fendas	Inverso 0/20mm	Flexível de referência
Estrutura								
Local		147+135 a 147+625 (C/G e G/C)	147+650 a 148+700 (C/G e G/C)	150+800 a 151+020 (C/G)	159+725 a 160+904 161+392 a 161+720 (C/G)	160+950 a 161+347 (C/G)	165+700 a 167+550 (C/G e G/C)	148+850 a 149+650 (C/G e G/C)
								

Tabela 4. Extensão e custo relativo das várias soluções (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Solução	Extensão (m)	Custo relativo
Pavimento semi-rígido de referência	15428	1
Interposição de camada granular (pavimento inverso)	1050 para 0/37.5 mm 1860 para 0/20 mm	1,10
Interposição de argamassa betuminosa	420	1,42
Interposição de penetração betuminosa	490	1,09
Interposição de geotextil	1507	1,09
Indução de fissuras	397	1,08
Pavimento flexível de referência	800	1,03

O programa adoptado neste estudo efectuado pelo LNEC permitiu obter resultados através da observação do fendilhamento. A observação dos pavimentos compreendeu uma inspecção visual em toda a extensão dos trechos executados, e ainda a auscultação em trechos piloto, aproximadamente rectilíneos em planta, com uma extensão de 200

metros, compreendeu ainda a realização de ensaios de carga e a avaliação do coeficiente de atrito, da macrotextura e da irregularidade longitudinal (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Na inspecção visual registaram o tipo de fendilhamento longitudinal, transversal e diagonal. A sua localização, a distância do início da fissura à berma e o seu desenvolvimento longitudinal e transversal, a gravidade da eventual desagregação da camada de desgaste, o tipo de ramificação da fissura e a quantificação da tortuosidade da fissura.

A Figura 24 mostra a evolução do número de fissuras transversais por km para as várias soluções de pavimento desde a abertura do tráfego até ao ano 2000.

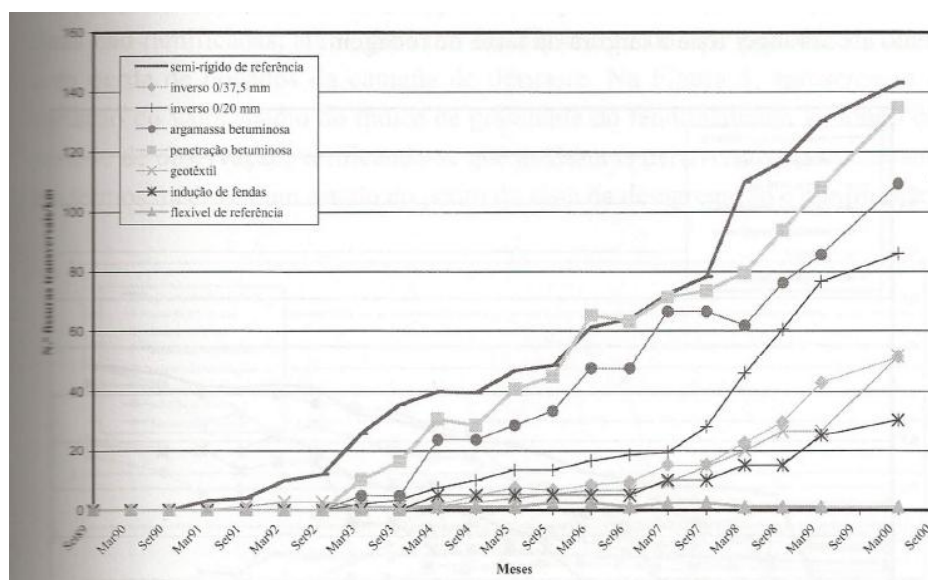


Figura 24. Número de fissuras transversais por km observado em 1989-2000 (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

O pavimento semi-rígido de referência apresentou a maior incidência em termos de número de fissuras transversais. Verificou-se que as várias soluções construídas tendo em vista limitar a propagação de fissuras se mostraram efectivas. Contudo os trechos com interposição de argamassa betuminosa ou de penetração betuminosa tinham quase o mesmo número de fissuras por km que a solução semi-rígida de referência.

A interposição de uma camada granular apresenta diferentes resultados, tendo o agregado com dimensão nominal 0/20 mm e o agregado com dimensão nominal 0/37,5

mm respectivamente cerca de 75% e cerca de 30% do número de fissuras por km da solução semi-rígida de referência.

Os trechos com geotêxtil impregnado e com indução de fendas foram os que apresentaram o melhor comportamento.

As fissuras não abrangem toda a largura da faixa de rodagem. Tendo em vista possibilitar uma avaliação da evolução do comprimento das fissuras transversais, verifica-se na Figura 25, a evolução do comprimento médio das fissuras relativamente à largura da faixa de rodagem (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

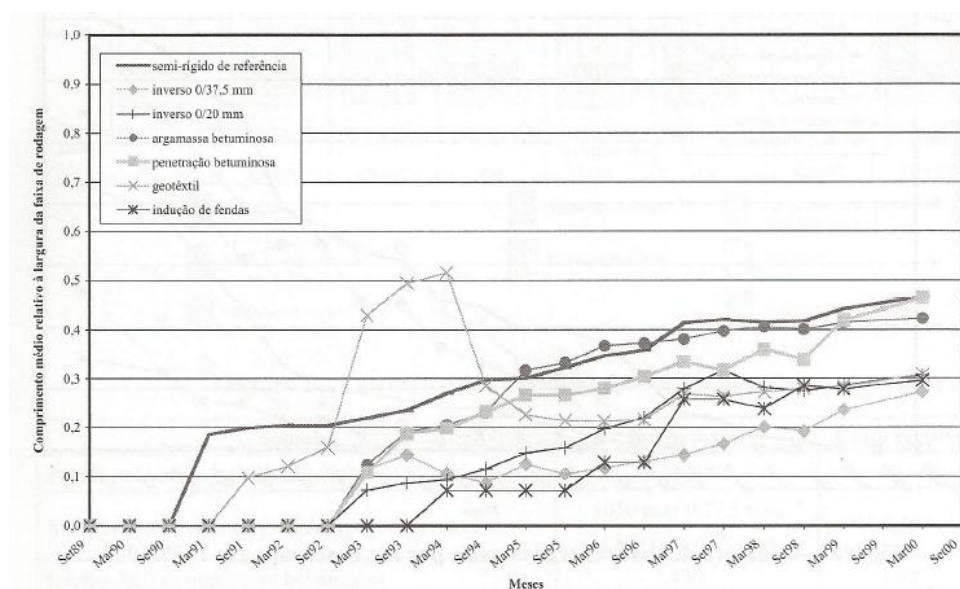


Figura 25. Comprimento médio das fissuras transversais relativamente à largura da faixa de rodagem, observado em 1989-2000 nas várias soluções do pavimento (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Verifica-se que, após mais de 10 anos da abertura ao tráfego, o comprimento médio das fissuras transversais é inferior a metade da largura da faixa de rodagem, o que significa que é previsível que continue a ocorrer uma evolução do comprimento total do fendilhamento transversal, à medida que as fissuras forem aumentando o comprimento até abranger toda a largura da faixa de rodagem.

Para quantificação da gravidade do fendilhamento observado atribuem-se, consoante o estado de degradação e ramificação das fendas, os índices indicados na Tabela 5.

Tabela 5. Materiais utilizados no estudo (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

	Classificação	Descrição	Índice
Desagregação	D1	Fenda fina, sem desagregação	1
	D2	Perda de agregados das bordas da fenda	1,5
	D3	Perda de bocados da camada na zona da fenda	2
Ramificação	R1	Não ramificada	1
	R2	Parcialmente ramificada	1,25
	R3	Parcialmente desdobrada	1,5
	R4	Pele de crocodilo	2

O índice adoptado para traduzir a gravidade do fendilhamento é obtido pelo produto do índice correspondente ao estado de ramificação, podendo tomar valores desde 1, para fendas finas não ramificadas, até 4, para um fendilhamento do tipo pele de crocodilo com perda de bocados da camada de desgaste (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Na Figura 26, apresenta-se a variação do valor médio do índice de gravidade do fendilhamento ao longo do período de observação, verificando-se que as fissuras transversais apresentaram, em termos médios, bom estado do ponto de vista da desagregação e da ramificação.

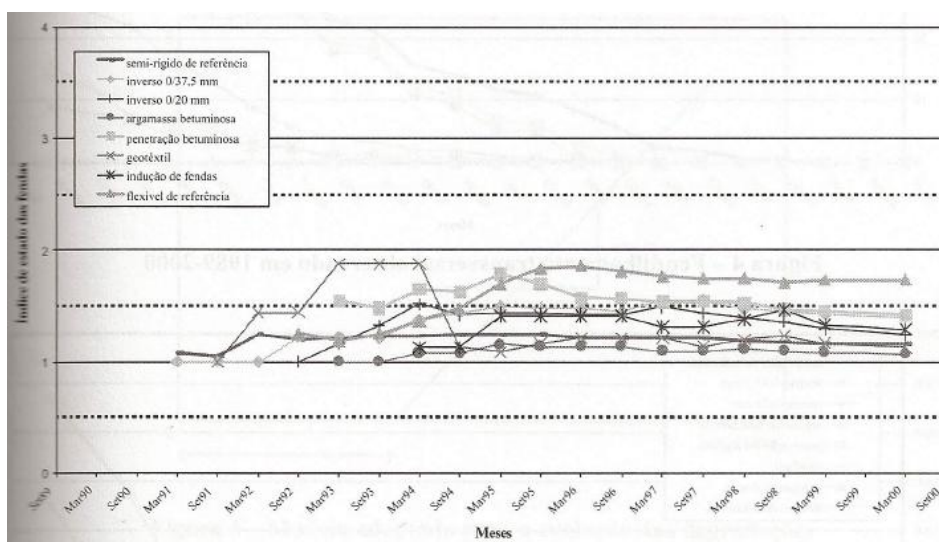


Figura 26. Evolução do valor médio do índice de gravidade das fissuras transversais observado em 1989-2000 nas várias soluções do pavimento (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Nas Figuras 27 e 28, são comparadas do ponto de vista do fendilhamento transversal e do fendilhamento longitudinal, as várias soluções de pavimento. O fendilhamento longitudinal foi expresso pelo comprimento total das fissuras longitudinais dividido pelo comprimento do trecho. Quando a solução foi aplicada em meia faixa de rodagem, a divisão foi realizada por metade do comprimento do trecho (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

As fissuras transversais não abrangem, em geral, toda a faixa de rodagem, sendo por vezes bastante curtas. Considerou-se para cada fissura o valor do quociente entre o comprimento da fissura e a largura da faixa de rodagem do pavimento. De seguida para cada solução de pavimento, foi calculada a soma, para o total das fissuras transversais, do valor daquele quociente individual de cada fissura, o que exprime um número equivalente de fissuras transversais abrangendo toda a largura da faixa de rodagem. A comparação entre as várias soluções de pavimento, relativamente ao fendilhamento transversal, foi realizada pelo quociente entre o número equivalente de fissuras transversais, abrangendo toda a largura da faixa de rodagem e a extensão do trecho, em km (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

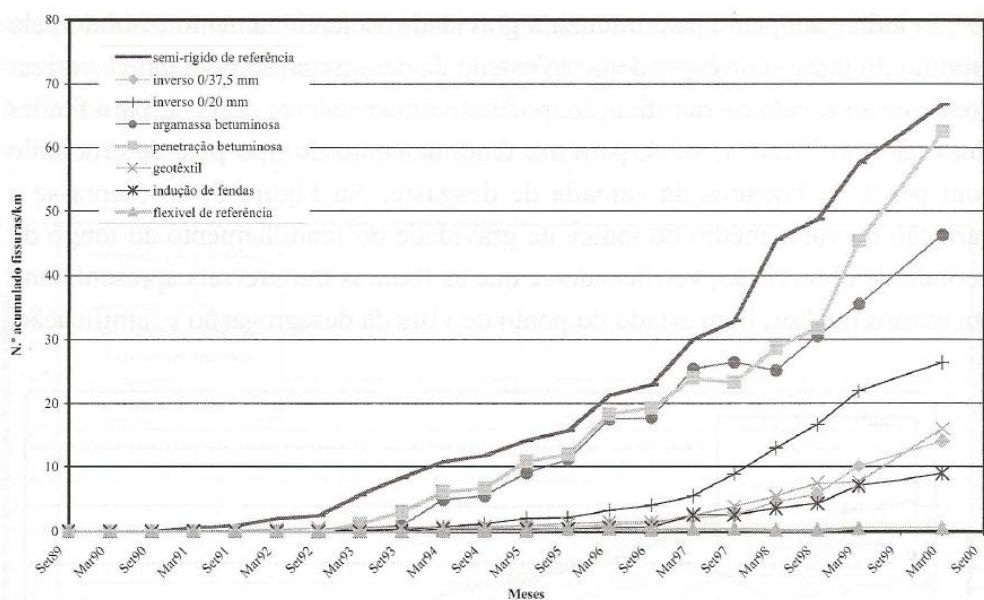


Figura 27. Fendilhamento transversal observado em 1989-2000 (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

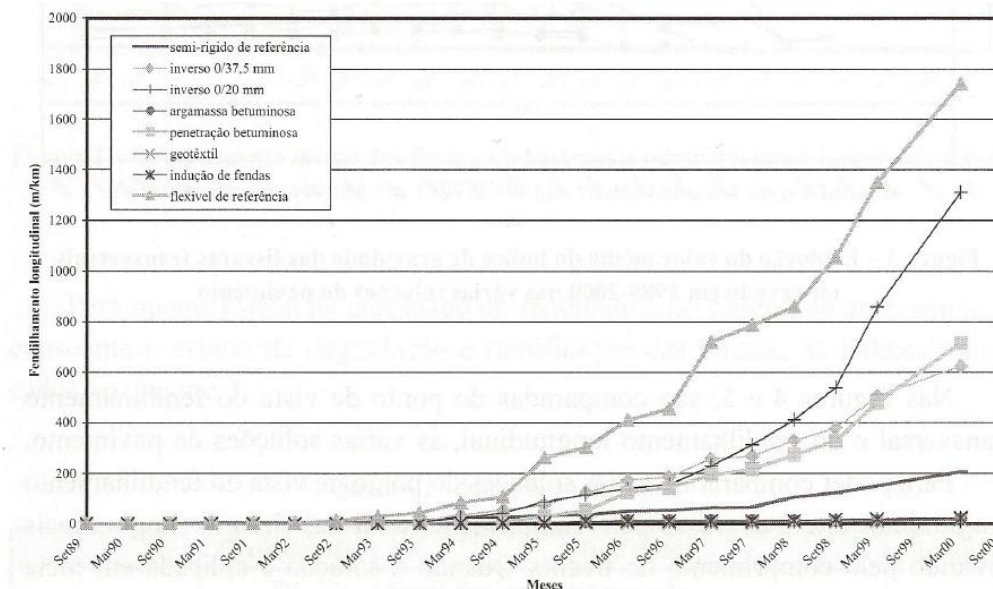


Figura 28. Fendilhamento longitudinal observado em 1989-2000 (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Da análise destas duas últimas figuras verifica-se que, tanto para o fendilhamento longitudinal como transversal, existe um período inicial (T_0) em que as degradações são diminutas e que, depois desta fase, existe um aumento do fendilhamento por ano. Na Figura 29 indica-se o modelo considerado para exprimir a evolução do fendilhamento longitudinal e do fendilhamento transversal, onde se admite uma evolução linear das degradações após o período inicial T_0 . Tal evolução é expressa, no caso do fendilhamento longitudinal, pelo aumento anual do comprimento das fissuras por km (m/ano) e para o fendilhamento transversal pelo aumento anual do número equivalente de fissuras transversais abrangendo toda a largura da faixa de rodagem por km (m/ano) (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

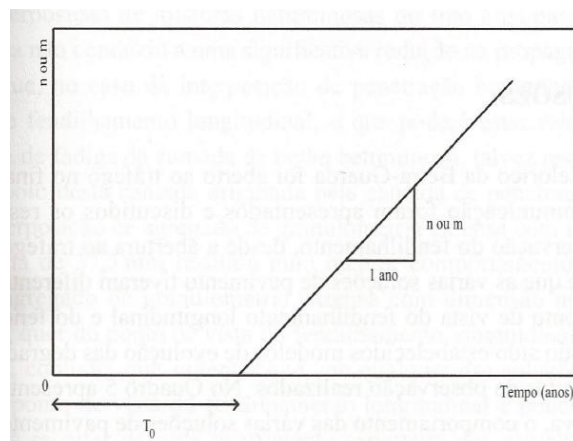


Figura 29. Modelo adoptado para a evolução das degradações (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Na Tabela 6 apresentam-se os valores dos parâmetros atrás referidos, os quais foram obtidos a partir de uma regressão feita às curvas apresentadas nas Figuras 27 e 28.

Deste estudo pôde concluir-se que, no lanço Celorico da Beira/Guarda que foi aberto ao tráfego em 1989 e no qual se apresentaram os resultados por 11 anos de observação do fendilhamento. Foi verificado que as várias soluções de pavimento, tiveram diferentes comportamentos do ponto de vista do fendilhamento longitudinal e do fendilhamento transversal. Foram assim estabelecidos modelos de evolução das degradações com base nos resultados da observação realizados. Apresenta-se na Tabela 6 de um modo qualitativo, o comportamento das várias soluções de pavimento (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Tabela 6. Apreciação comparativa do comportamento das diferentes soluções de pavimentação (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

	Fendilhamento transversal	Fendilhamento longitudinal
Semi-rígido de referência	—	+
Inverso c/ agregado 0/37,5	+	=
Inverso c/ agregado 0/20	=	= / —
Argamassa betuminosa	—	+
Penetração betuminosa	—	=
Geotextil	+	+
Indução de fendas	+	+
Flexível de referência	+	—

+ melhor comportamento
= comportamento médio
— pior comportamento

Os resultados parecem comprovar as diferenças de comportamento entre as soluções de pavimento semi-rígido e de pavimento flexível.

O pavimento semi-rígido exhibe um importante fendilhamento transversal resultante da propagação até à superfície das fissuras que se formam logo após a sua construção, na camada de betão pobre, em resultado da contracção térmica e higrométrica (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

O pavimento flexível exhibe um importante fendilhamento longitudinal em resultado da fadiga das camadas betuminosas, que está associado a um esgotamento da capacidade de carga de um pavimento em face das acções a que está sujeito.

A interposição das misturas betuminosas do tipo argamassa e penetração betuminosa não conduziu a uma significativa redução na propagação das fissuras. No caso da penetração betuminosa, ocorreu um importante fendilhamento longitudinal, o que poderá estar relacionado com a ocorrência de fadiga da camada de betão betuminoso, talvez resultante da natureza do apoio desta camada originada pela camada de penetração betuminosa.

A interposição de agregado de granulometria extensa com dimensão nominal máxima de 37,5 mm resultou de um melhor comportamento que a de 20 mm, quer do ponto de vista do fendilhamento longitudinal, quer do fendilhamento transversal. Contudo, é importante focar, que em qualquer das soluções, o comportamento do ponto de vista do fendilhamento longitudinal é pouco satisfatório, o que se deverá ao facto de uma insuficiente espessura das camadas betuminosas, quando é interposta uma camada granular entre as camadas betuminosas e a camada de betão pobre (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

Verificou-se ainda que as soluções com interposição de geotêxtil impregnado e de indução de fendas são as que globalmente apresentam o melhor comportamento (L. QUARESMA *et al.*, 2002).

De seguida, apresentam-se algumas fotografias retiradas no local da obra em Maio de 1989 por Luís Quaresma, das diversas soluções focadas anteriormente, nos trechos piloto realizados no lanço do IP5 entre Celorico da Beira e Guarda.



Figura 30. Indução de fissuras por cravação de perfil metálico no betão pobre (QUARESMA, 1992).



Figura 31. Aplicação de tira de geotêxtil num dos cortes (QUARESMA, 1992).



Figura 32. Aspecto superficial do agregado usado na penetração betuminosa (QUARESMA, 1992).



Figura 33. Compactação da argamassa betuminosa (QUARESMA, 1992).

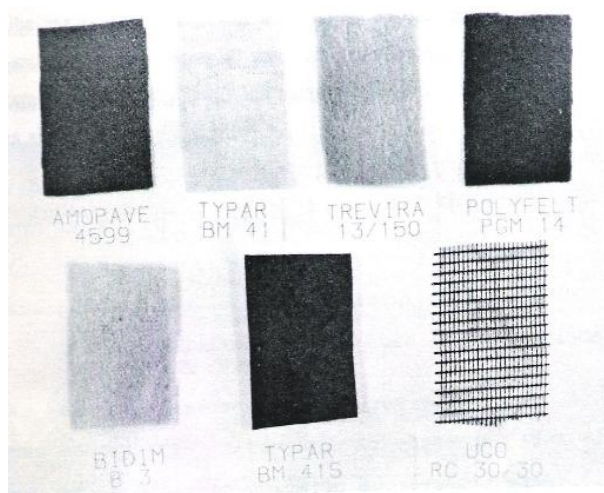


Figura 34. Geotêxteis aplicados (QUARESMA, 1992).

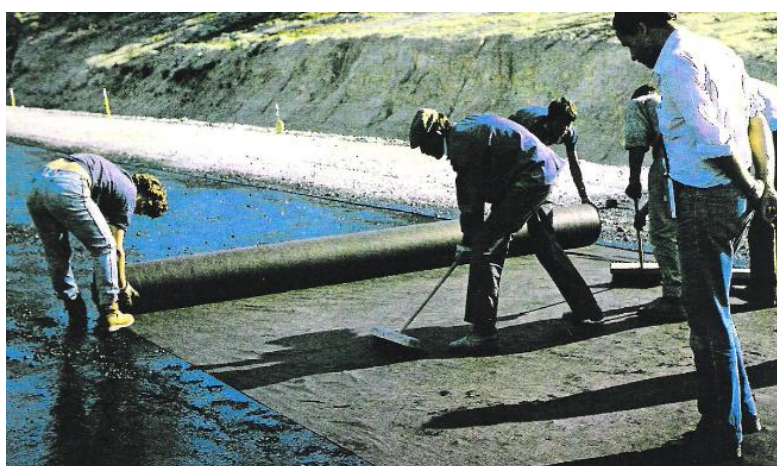


Figura 35. Aplicação manual de geotêxtil (QUARESMA, 1992).



Figura 36. Aplicação mecânica de geotêxtil (QUARESMA, 1992).

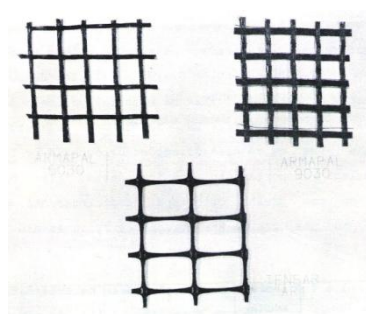


Figura 37. Geogrelhas aplicadas (QUARESMA, 1992).



Figura 38. Aplicação de uma geogrelha ARMAPAL (QUARESMA, 1992).



Figura 39. Tracionamento da geogrelha TENSAR (QUARESMA, 1992).



Figura 40. Espalhamento do material granular com máquina espalhadora/acabadora (QUARESMA, 1992).

5. MODELAÇÃO DE PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS FENDILHADOS NA CAMADA DE BASE

Neste capítulo apresentam-se as modelações numéricas efectuadas para este estudo. Fez-se uma análise ao nível de tensões instaladas no pavimento, verificando como se propaga à superfície uma fenda existente na camada de base do pavimento semi-rígido.

5.1. Modelação Numérica

Para modelar um pavimento recorreu-se ao programa de elementos finitos SAP2000® (versão 14), onde se considerou três classes de estruturas de pavimento, conforme as classes de tráfego T1, T3 e T6, definidas no Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), que representam respectivamente, as diferentes espessuras de camada de pavimento utilizadas nos modelos.

Considerou-se assim para os vários modelos as mesmas características mecânicas dos materiais, sabendo-se porém, que estas características variam conforme o solo. Os modelos não foram dimensionados, pois não era objectivo deste trabalho proceder a um modelo baseado em dados concretos de um determinado tipo de pavimento.

Pretende-se que os vários modelos numéricos sejam solicitados em locais próximos da fenda induzida, para que se possa obter uma comparação ao nível de tensões instaladas. E observar se a influência ao nível de tensões que esta camada apresenta é relevante para o estudo da reflexão de fendas às camadas superiores do pavimento.

A carga utilizada nos modelos será uniformemente distribuída de 130 kN/m e aplicada em 40 cm de pavimento. Será colocada uma carga junto à fenda, a 5 cm, denominada por carga 1. E será colocada outra carga a cerca de 1.50 m da localização da fenda, denominada por carga 2. Este processo será efectuado para fendas com diferentes aberturas, respectivamente com 2 mm, 4 mm e 6 mm.

5.2. Constituição dos Modelos

O MACOPAV apresenta uma orientação ao nível do dimensionamento e concepção das estruturas de pavimentos e respectivas fundações. Apresenta várias soluções de pavimentação, ao qual deve ser escolhida para cada caso concreto a mais adequada, tendo como orientação considerações técnico-económicas, condições geotécnicas e climáticas, os materiais disponíveis, os prazos de execução e as exigências futuras dos pavimentos (JAE, 1995).

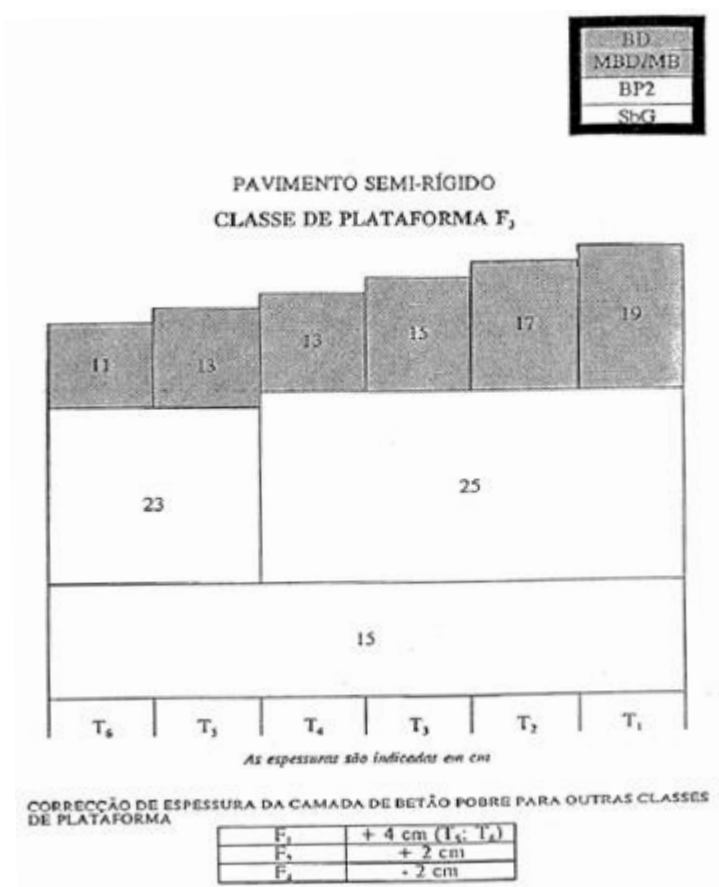


Figura 41. Estrutura de Pavimento Semi-rígido (JAE, 1995).

Na Figura 41, apresenta-se a estrutura de um pavimento do tipo semi-rígido que será utilizado como base para obter as espessuras das camadas dos diversos materiais a utilizar nos modelos, em que, o betão betuminoso (BD+MBD/MB) pode apresentar na sua constituição espessuras a variarem entre 10 cm a 20 cm. O material granular com ligante hidráulico (BP), pode ter espessuras que variam de 20 cm a 40 cm. O solo ou material granular não ligado ou ligado com ligante hidráulico (SbG), pode ter espessuras a variar entre 15 cm a 25 cm.

Os modelos considerados para este estudo apresentam uma classe de plataforma F3 e as espessuras das camadas adoptadas, correspondem à classe de tráfego T1, T3 e T6, reflectindo-se respectivamente nas seguintes espessuras de material:

Tabela 7. Espessuras dos modelos utilizados nas modelações numéricas.

Classe de Tráfego	T1 (espessura)	T3 (espessura)	T6 (espessura)
MB (1ª camada)	19 cm	15 cm	11 cm
BP (2ª camada)	25 cm	25 cm	23 cm
SbG (3ª camada)	15 cm	15 cm	15 cm

Os modelos que irão ser submetidos a análise são os seguintes:

Modelo de Pavimento T1:

i) Carga 1:

- Fenda com 2 mm
- Fenda com 4 mm
- Fenda com 6 mm

ii) Carga 2:

- Fenda com 2 mm

- Fenda com 4 mm
- Fenda com 6 mm

Modelo de Pavimento T3:

i) Carga 1:

- Fenda com 2 mm
- Fenda com 4 mm
- Fenda com 6 mm

ii) Carga 2:

- Fenda com 2 mm
- Fenda com 4 mm
- Fenda com 6 mm

Modelo de Pavimento T6:

i) Carga 1:

- Fenda com 2 mm
- Fenda com 4 mm
- Fenda com 6 mm

ii) Carga 2:

- Fenda com 2 mm
- Fenda com 4 mm
- Fenda com 6 mm

O modelo de pavimento considerado será constituído por 3 camadas de material, as camadas superiores constituídas por misturas betuminosas (MB), seguidas de uma camada de base de betão pobre (BP) e uma camada granular na sub-base (SbG), apoiadas no solo de fundação.

T1

MB (10 a 20 cm)	camadas superficiais	19 cm
BP (20 a 40 cm)	camada de base	25 cm
SbG (15 a 25 cm)	camada de sub-base	15 cm
Solo (maciço semi-indefinido)	fundação	40 cm

Figura 42. Esquema tipo das espessuras consideradas no ‘Modelo T1’, fendilhado na camada de base.

Para construir os ‘Modelos’, considerou-se no programa de elementos finitos Sap2000 os seguintes parâmetros:

- Unidades: kN, m, C.
- Características mecânicas dos materiais:

Tabela 8. Características mecânicas dos materiais usados na modelação numérica.

Misturas Betuminosas (MB)	$\gamma=13$	$E=4\,000\,000\text{ kPa}$	$\nu=0.35$
Betão Pobre (BP)	$\gamma=24$	$E=20\,000\,000\text{ kPa}$	$\nu=0.25$
Brita (SbG)	$\gamma=15$	$E=250\,000\text{ kPa}$	$\nu=0.30$
Solo (Fund)	$\gamma=18$	$E=110\,000\text{ kPa}$	$\nu=0.35$

- O Modelo de Pavimento terá 6 m de comprimento e uma fenda localizada na camada de base do pavimento a 3 m (meio vão). A malha da modelação terá que ter em conta a distância de aplicação da carga pretendida.
- Localização das cargas uniformemente distribuídas de 130 kN/m, aplicadas à direita da fenda induzida, em 40 cm da superfície do pavimento:
 - ✓ A Carga 1 foi aplicada a uma distância de 5 cm da fenda, até aos 45 cm.
 - ✓ A Carga 2 foi aplicada a uma distância de 1.50 m da fenda, até aos 1.95 m.

Em seguida, procede-se à indicação dos resultados obtidos das modelações.

5.3. Análise da Propagação de Fendas às Camadas Superiores do Pavimento

5.3.1. Modelo de Pavimento T1

5.3.1.1. Carga 1 aplicada junto à fenda:

Efectuou-se a modelação numérica simulando um pavimento com 6 m, fendilhado a meio vão na camada de base com abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm. Foi aplicada uma carga de 130 kN/m numa área com 40 cm, à direita da fenda e a cerca de 5 cm desta.

Para uma abertura de fenda com 2 mm, obteve-se as tensões máximas através da modelação numérica denominada ‘Modelo T1 – carga 1 – fenda 2 mm’, que podem ser observadas na Figura 43:

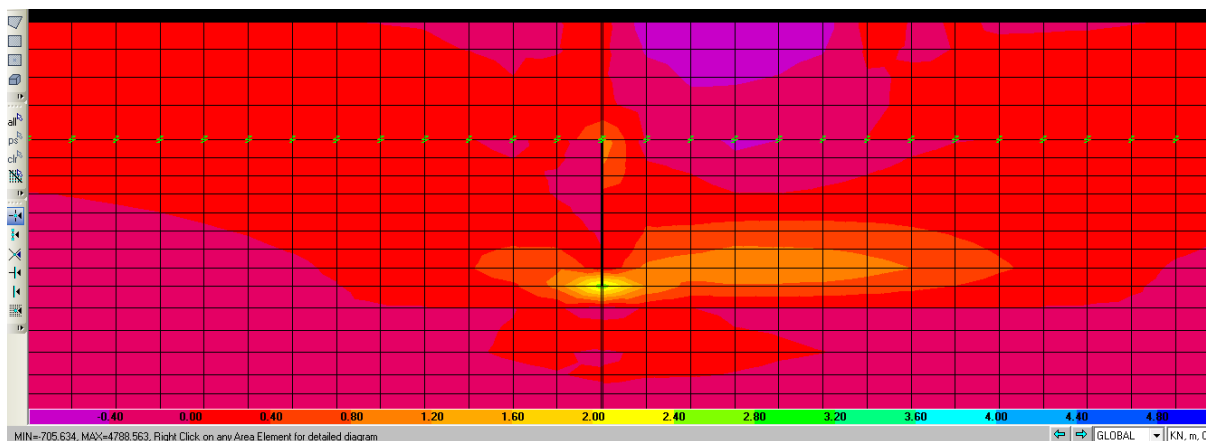


Figura 43. Modelação Numérica do 'Modelo T1 – carga 1 – fenda 2 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

Utilizou-se o mesmo tipo de modelo, mas para fendas de 4 mm e 6 mm de abertura, como se pode observar, respectivamente, nas Figuras 44 e 45 abaixo indicadas:

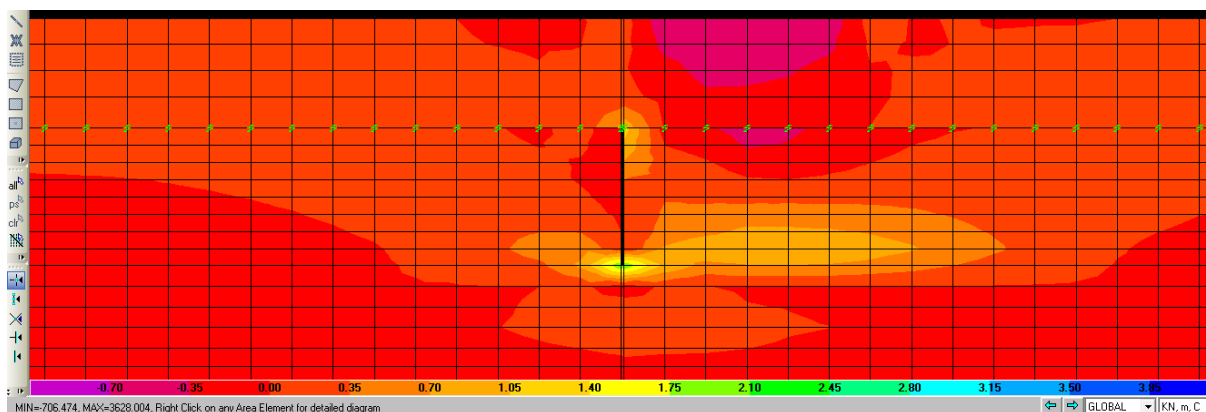


Figura 44. Modelação Numérica do 'Modelo T1 – carga 1 – fenda 4 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

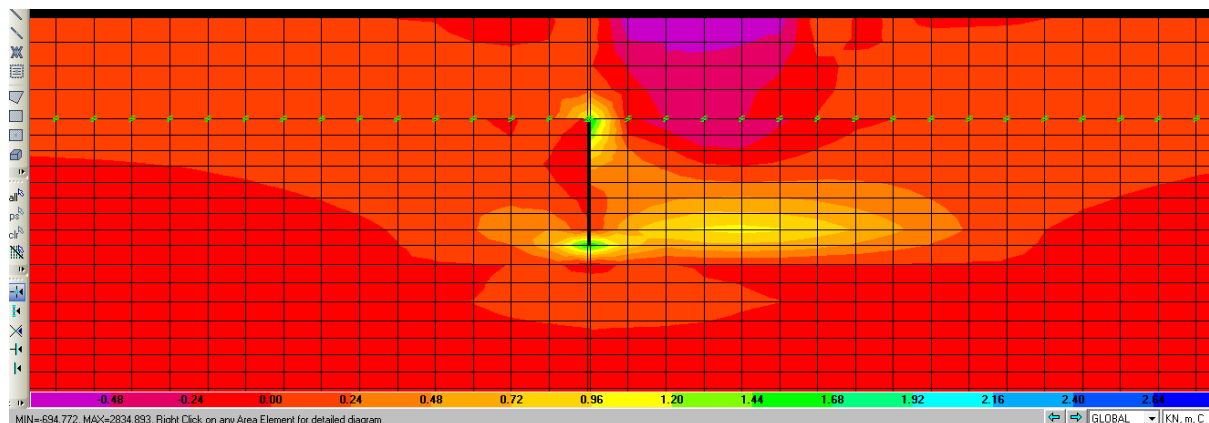


Figura 45. Modelação Numérica do 'Modelo T1 – carga 1 – fenda 6 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

Das modelações acima indicadas, obteve-se graficamente na zona de transição entre a camada de base do pavimento fendilhado, que é composta por betão pobre e a camada superficial do pavimento, que é composta por misturas betuminosas, as seguintes tensões:

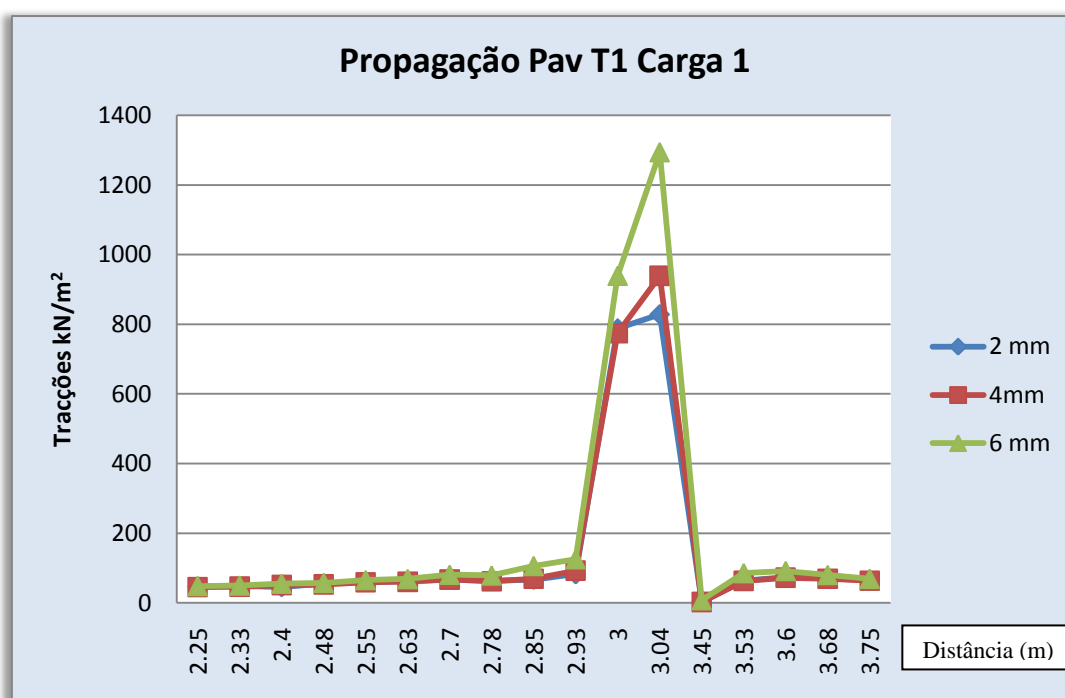


Figura 46. Tracção máxima no pavimento T1 por aplicação da carga 1.

Pode observar-se pelo gráfico da Figura 46, que o pavimento semi-rígido do tipo T1 apresenta maiores tracções junto à fenda para uma abertura de fenda de 6 mm, ou seja,

para uma abertura de fenda já bastante significativa no interior do pavimento. Podendo concluir-se, que num pavimento do tipo T1, que representa um pavimento do tipo semi-rígido com as maiores espessuras das camadas, obtém-se uma maior propagação de fendas, quando maior for a abertura de fendas existente na camada de base.

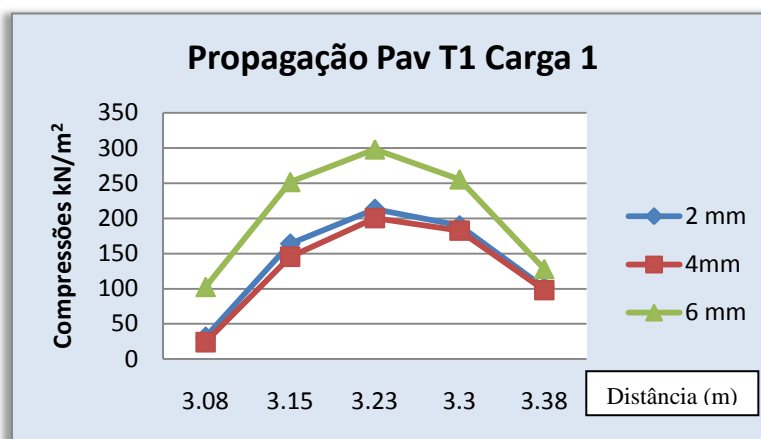


Figura 47. Compressão máxima no pavimento T1 – zona da aplicação da carga 1.

Através do gráfico representado pela Figura 47, é possível verificar que o pavimento fendilhado que apresenta melhor resistência à compressão é o que contém a abertura da fenda de 4 mm. Não estando muito longe deste mesmo resultado, encontra-se o pavimento fendilhado com abertura de fenda de 2 mm. É notório que o pavimento com fenda de 6 mm apresenta-se mais comprimido, logo torna-se o pavimento que pior resistirá a cargas elevadas provenientes do tráfego rodoviário, quando este se encontra muito próximo da fenda.

5.3.1.2. Carga 2 aplicada mais distante da fenda:

Efectuou-se modelações numéricas para fendas com aberturas de 2 mm, 4 mm e 6 mm, para uma carga de 130 kN/m, aplicada à direita da fenda numa área de 40 cm, mas com um carregamento mais afastado desta, a cerca de 1.50 m. Originando as tensões máximas que podem ser observadas nas Figura 48, 49 e 50:

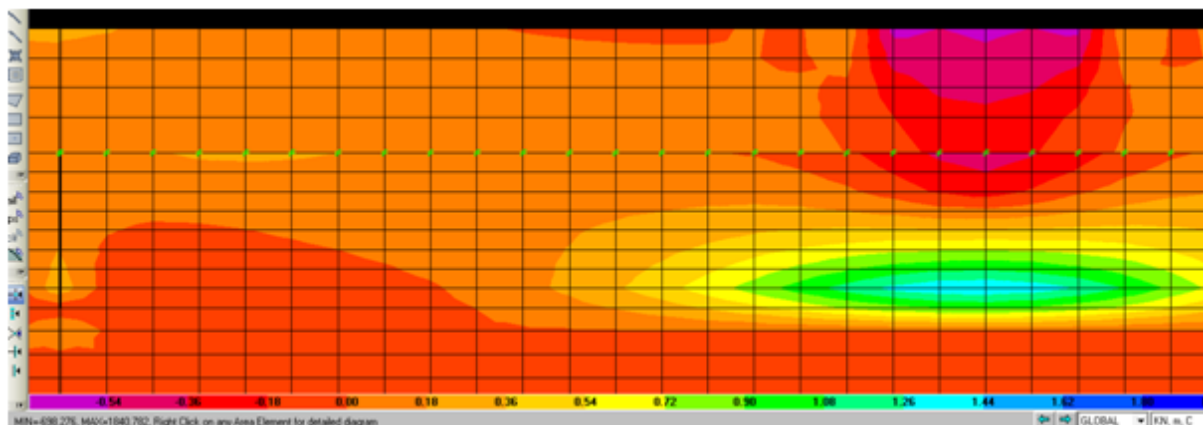


Figura 48. Modelação Numérica do 'Modelo T1 – carga 2 – fenda 2 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

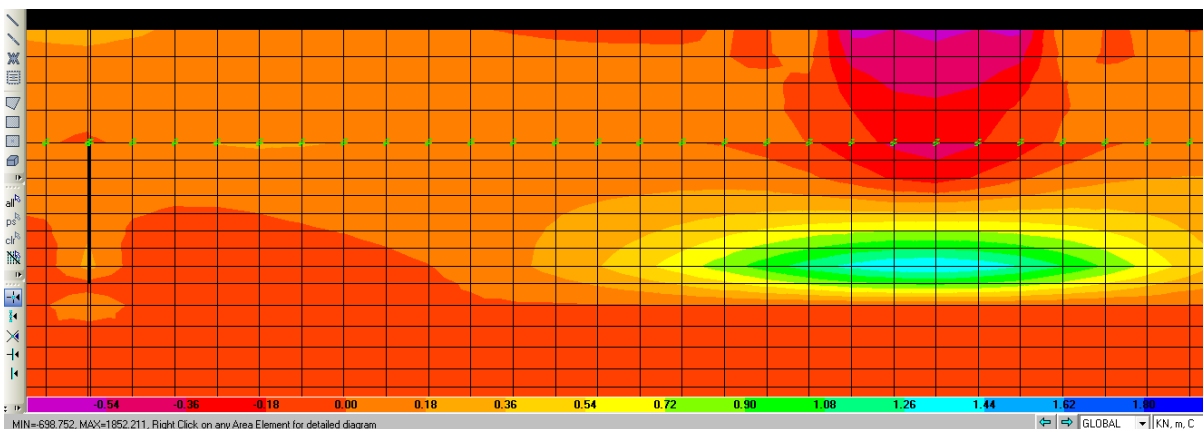


Figura 49. Modelação Numérica do 'Modelo T1 – carga 2 – fenda 4 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

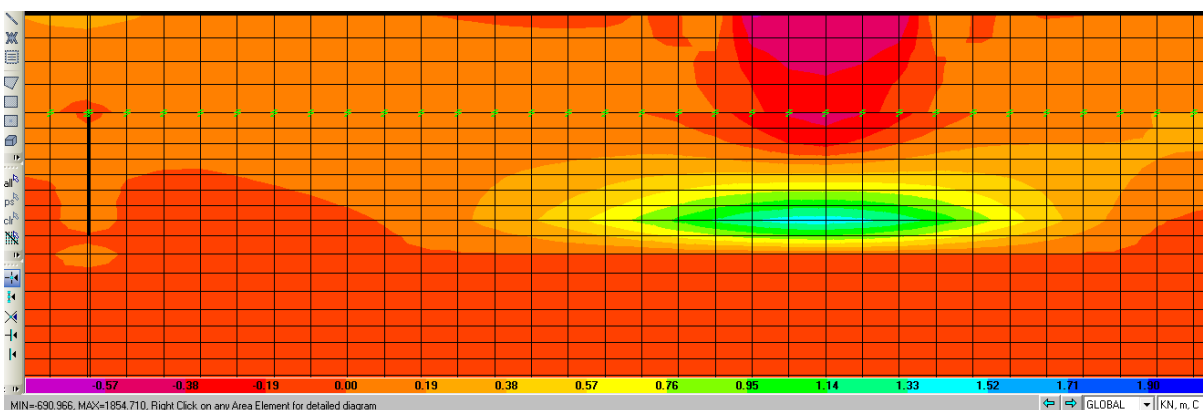


Figura 50. Modelação Numérica do 'Modelo T1 – carga 2 – fenda 6 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

Tal como para a carga 1, também foram realizados gráficos representativos da zona de transição da camada de base (BP) para a camada superficial (MB), por aplicação da carga 2. Podem observar-se as tensões máximas instaladas no pavimento, quando este se

encontra sujeito a uma aplicação de carga mais afastada da zona da fenda. Verificando-se as seguintes tensões:

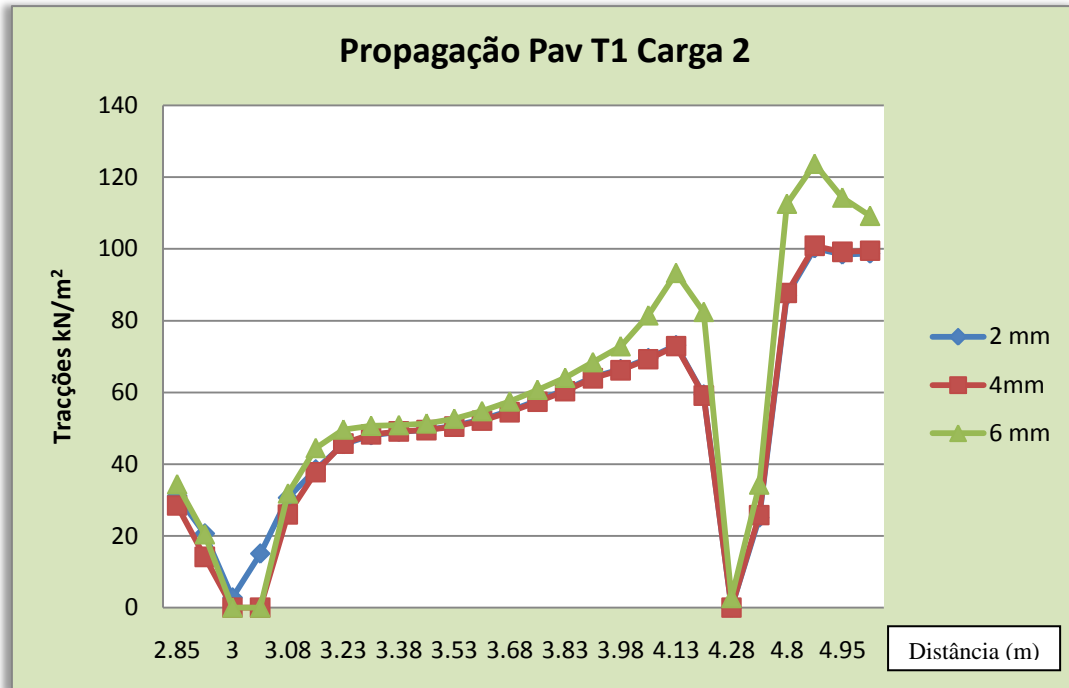


Figura 51. Tracção máxima no pavimento T1 por aplicação da carga 2.

No gráfico da Figura 51, é possível observar que as maiores tracções se encontram na zona da aplicação da carga para uma abertura de fenda de 6 mm. Embora na zona da fenda, do lado da aplicação da carga, para uma abertura de fenda de 2 mm, existe uma relevância de maiores tracções, em relação às aberturas de fenda de 4 mm e de 6 mm. O que leva a crer que existirá um provável aumento da abertura de fenda de 2 mm, aquando da aplicação da carga mais distante da fenda.

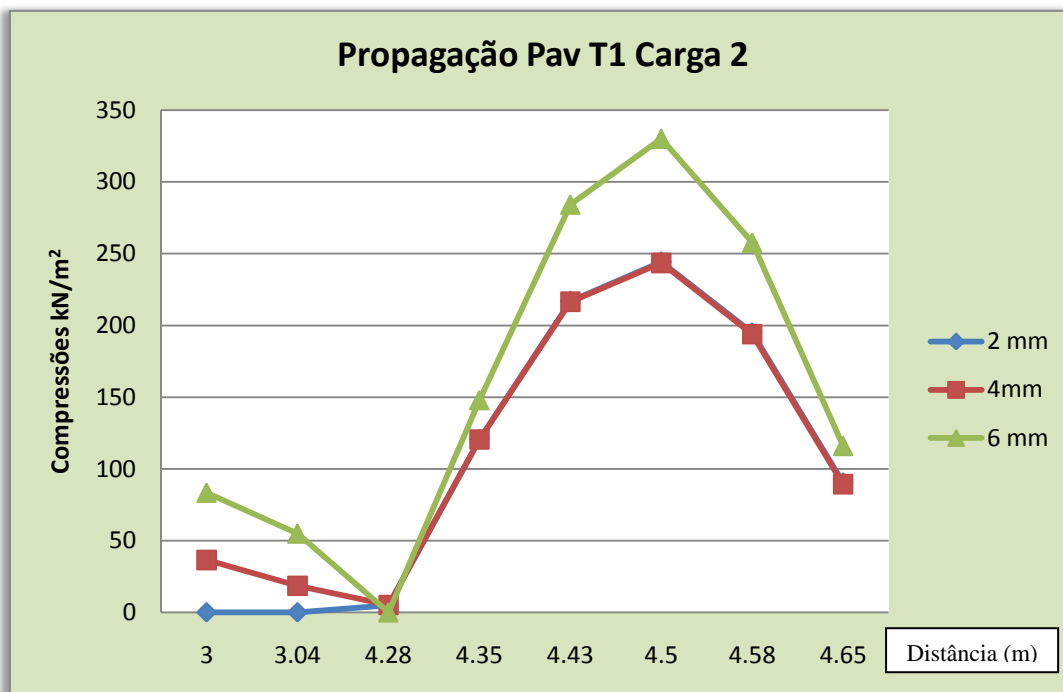


Figura 52. Compressão máxima no pavimento T1 – zona da aplicação da carga 2.

Junto à fenda, observa-se pela Figura 52 que existe alguma compressão para a abertura de fendas de 6 mm e 4 mm. Onde se verifica de imediato, um decréscimo de compressões até cerca de 1.20 m na direcção da zona de aplicação da carga 2, verificando-se em seguida um aumento crescente de tracções na zona de aplicação da carga.

As maiores compressões revelam ser as da abertura de fenda 6 mm na zona de aplicação da carga. Na mesma linha de compressão, podemos observar que se encontra a abertura de fendas de 2 mm e de 4 mm. Podendo afirmar-se que para a solicitação da carga 2, o pavimento com maior espessura das camadas que não resiste tão bem à compressão, é o que apresenta uma abertura de fenda superior a 4mm.

5.3.2. Modelo de Pavimento T3

5.3.2.1. Carga 1 aplicada junto à fenda:

Procedeu-se novamente à modelação numérica, fazendo simular um pavimento com espessura de camada do tipo T3, com 6 m, fendilhado a meio vão na camada de base com abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm. Foi também sujeito a uma carga de 130

kN/m, aplicada no pavimento numa área com 40 cm à direita da fenda e a cerca de 5 cm desta.

Para abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm, obtiveram-se as seguintes modelações numéricas, que representam as tensões máximas instaladas no pavimento:

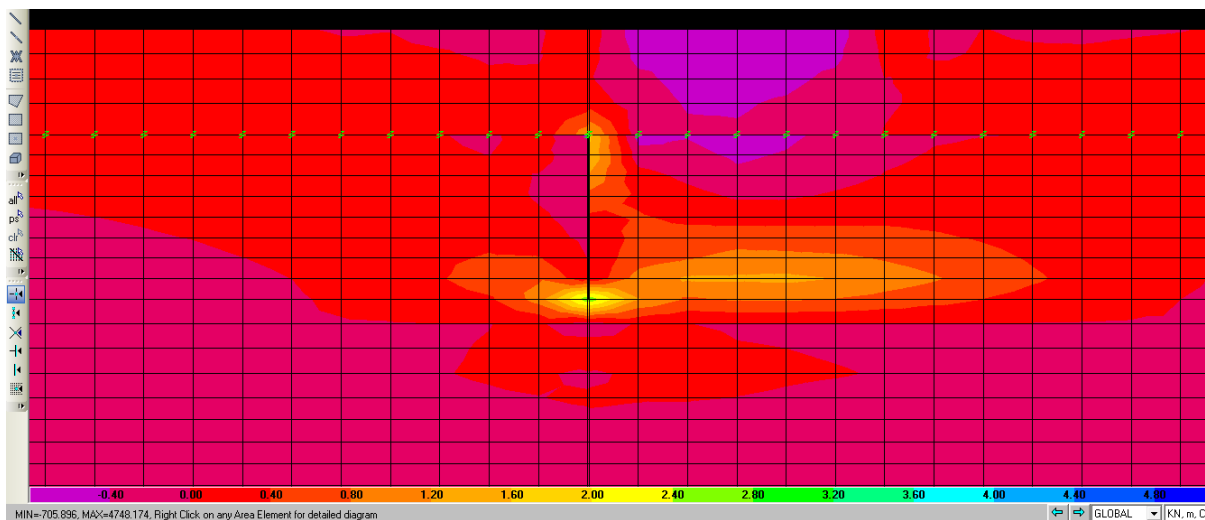


Figura 53. Modelação Numérica do 'Modelo T3 – carga 1 – fenda 2 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

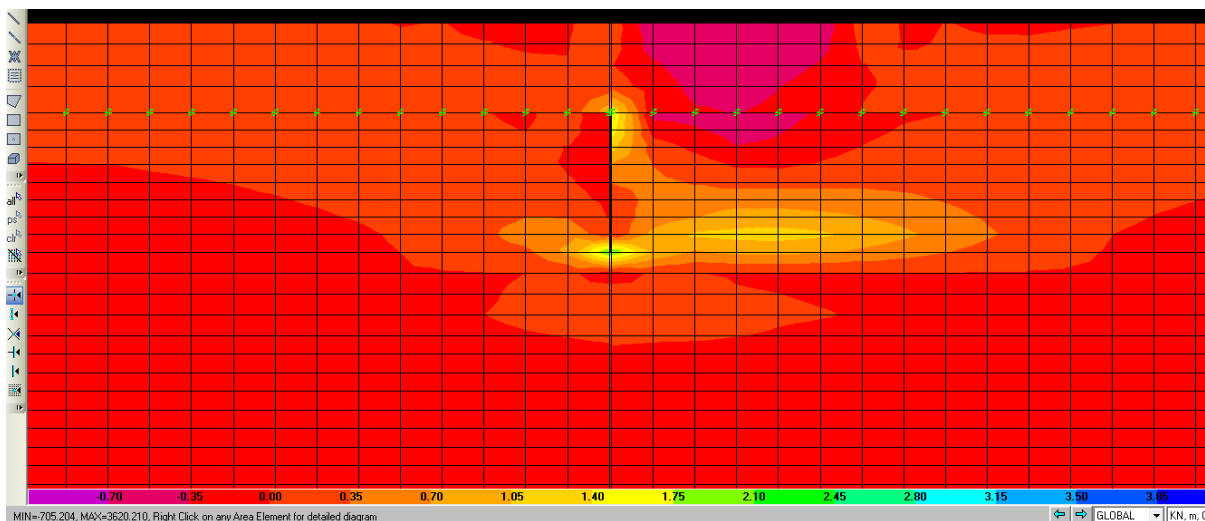


Figura 54. Modelação Numérica do 'Modelo T3 – carga 1 – fenda 4 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

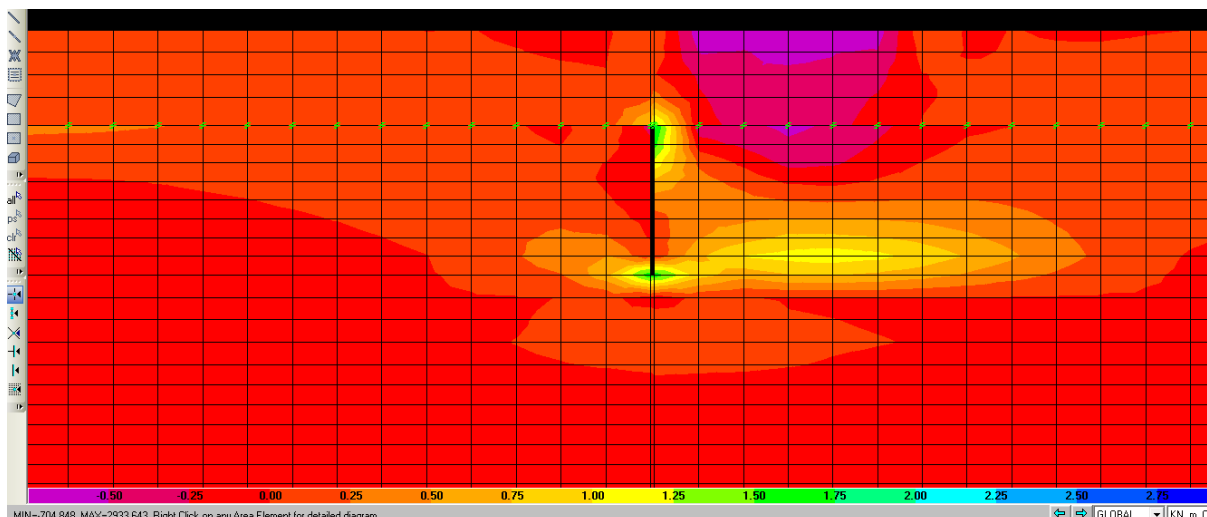


Figura 55. Modelação Numérica do 'Modelo T3 – carga 1 – fenda 6 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

Das modelações acima indicadas, obteve-se graficamente na zona de transição entre a camada de base do pavimento fendilhado e a camada superficial do pavimento, as seguintes tensões:

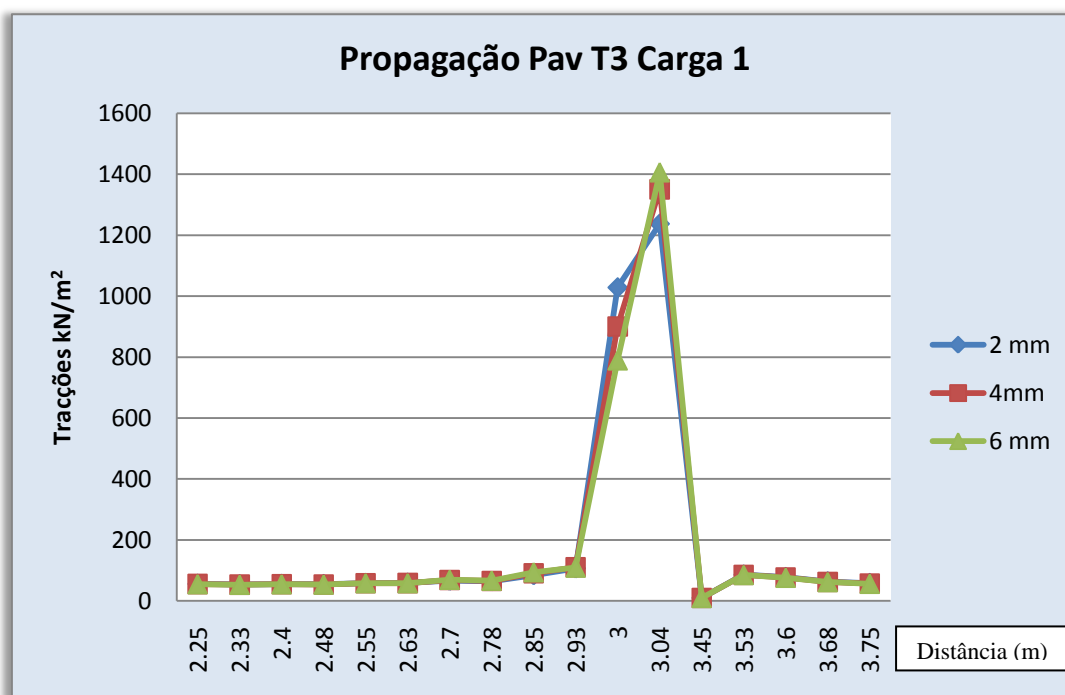


Figura 56. Tracção máxima no pavimento T3 por aplicação da carga 1.

O pavimento semi-rígido do tipo T3 representa em relação ao pavimento do tipo T1, uma redução de 4 cm de espessura de camada superficial com misturas betuminosas.

Por observação do gráfico da Figura 56, verifica-se que o pavimento considerado no modelo T3, apresenta um comportamento quase idêntico ao nível de tracções junto à fenda, para as três aberturas de fenda. Podendo concluir-se, que num pavimento do tipo T3, após carregamento junto à fenda, obtém-se uma propagação de fendas quase idêntica para abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm. Embora seja notável que existe maior tracção para as aberturas de fendas de 4 mm e de 6 mm. O que permite concluir, que serão as maiores aberturas de fendas as mais propícias e gravosas a propagarem-se até à superfície.

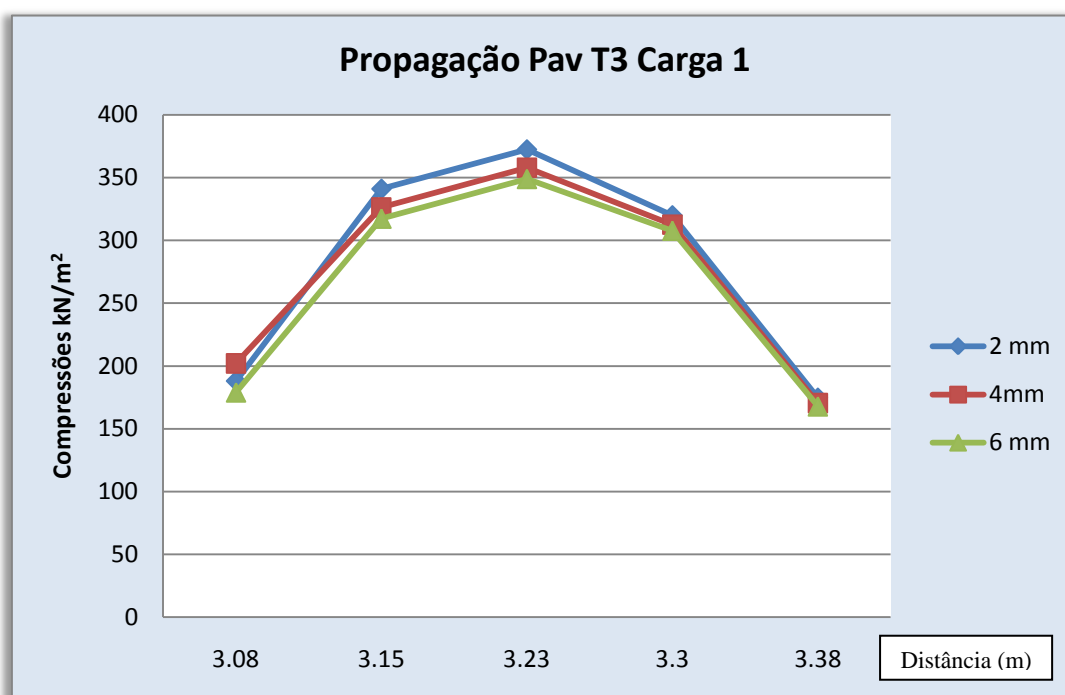


Figura 57. Compressão máxima no pavimento T3 – zona da aplicação da carga 1.

Pelo gráfico representado na Figura 57, é possível verificar que o pavimento fendilhado que apresenta melhor resistência à compressão, é o que contém a abertura da fenda de 6 mm, embora não estando muito longe deste mesmo resultado, encontra-se o pavimento fendilhado com abertura de fenda de 4 mm. Sendo que, o pavimento que se apresenta mais comprimido é o que contém a fenda de 2 mm, logo torna-se o pavimento que pior resistirá a cargas elevadas provenientes do tráfego rodoviário, quando este se encontra muito próximo da fenda. Pode ainda observar-se junto da fenda, a 3.08 m, que o pavimento que está mais comprimido é o pavimento com a fenda de 4 mm, embora aumentem as compressões junto da zona de aplicação da carga em todas as aberturas de

fendas, é o pavimento com fenda de 2 mm que se revela o que irá sofrer mais compressão com a solicitação aplicada.

5.3.2.2. Carga 2 aplicada mais distante da fenda:

Efectuou-se modelações numéricas para um modelo de pavimento T3, contendo aberturas de fendas com 2 mm, 4 mm e 6 mm, para uma mesma carga de 130 kN/m, aplicada à direita da fenda, mas com um carregamento mais afastado desta, a cerca de 1.50 m e com aplicação no pavimento numa área de 40 cm. Originando as tensões máximas que podem ser observadas nas Figura 58, 59 e 60:

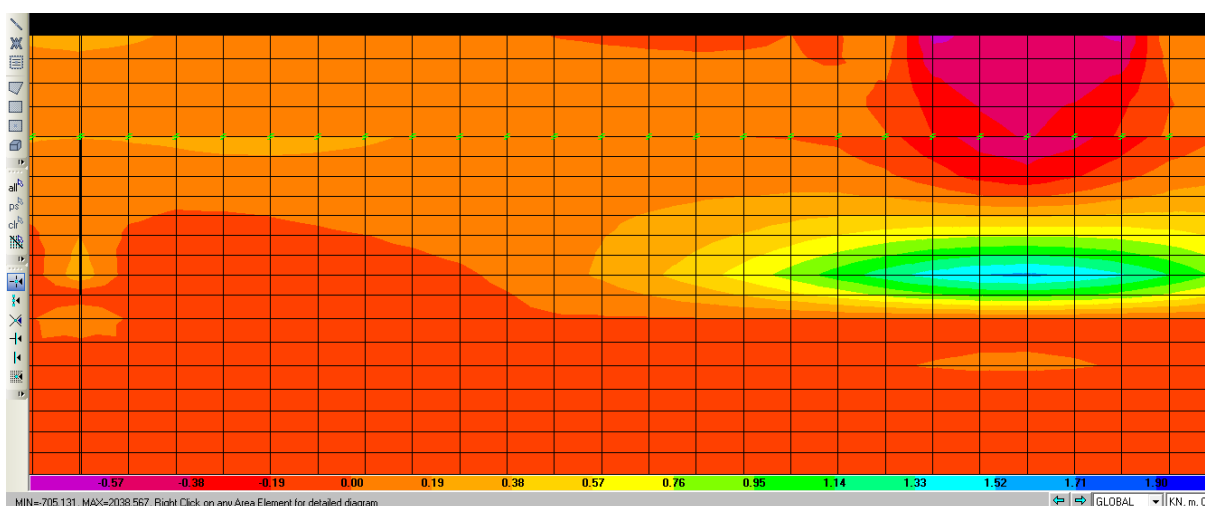


Figura 58. Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 2 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

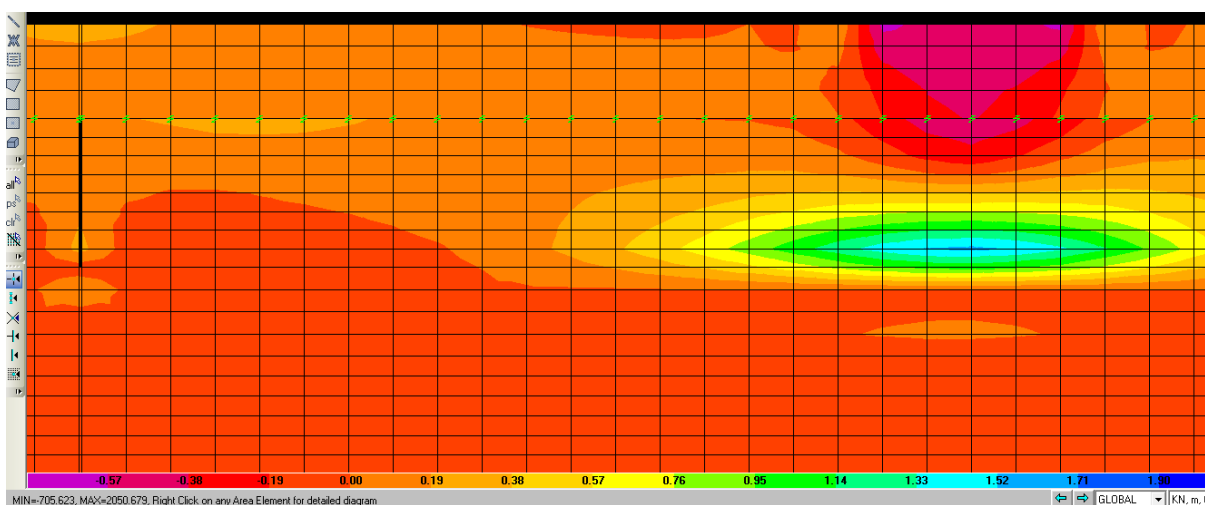


Figura 59. Modelação Numérica do ‘Modelo T3 – carga 2 – fenda 4 mm’. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

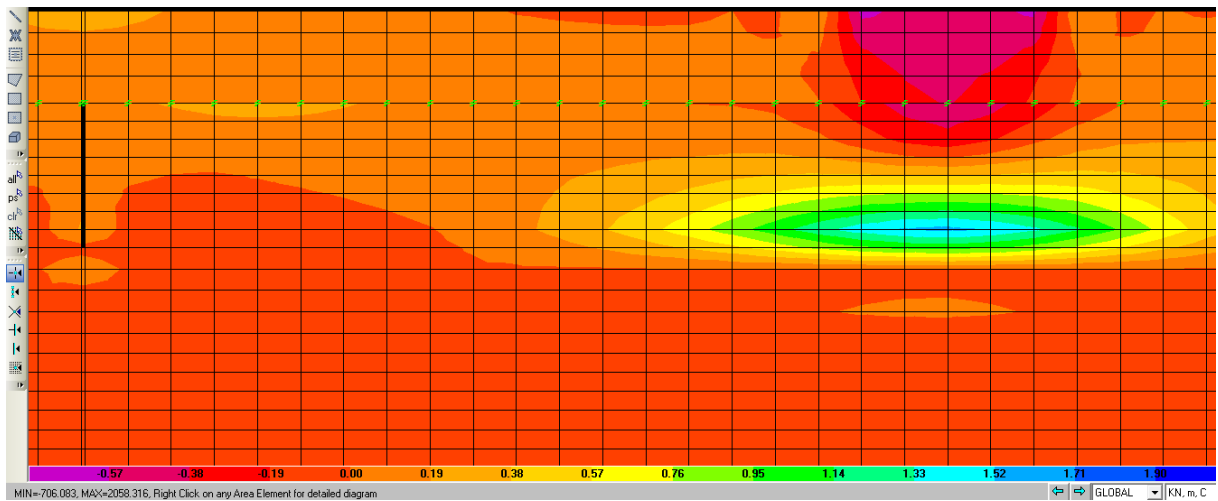


Figura 60. Modelação Numérica do 'Modelo T3 – carga 2 – fenda 6 mm'. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

Como para a carga 1 do modelo de pavimento T3, também foram realizados gráficos representativos da zona de transição da camada de base (BP) para a camada superficial (MB), por aplicação da carga 2. Podem observar-se as tensões máximas instaladas no pavimento, quando este se encontra sujeito a uma aplicação de carga mais afastada da zona da fenda. Verificando-se as seguintes tensões:

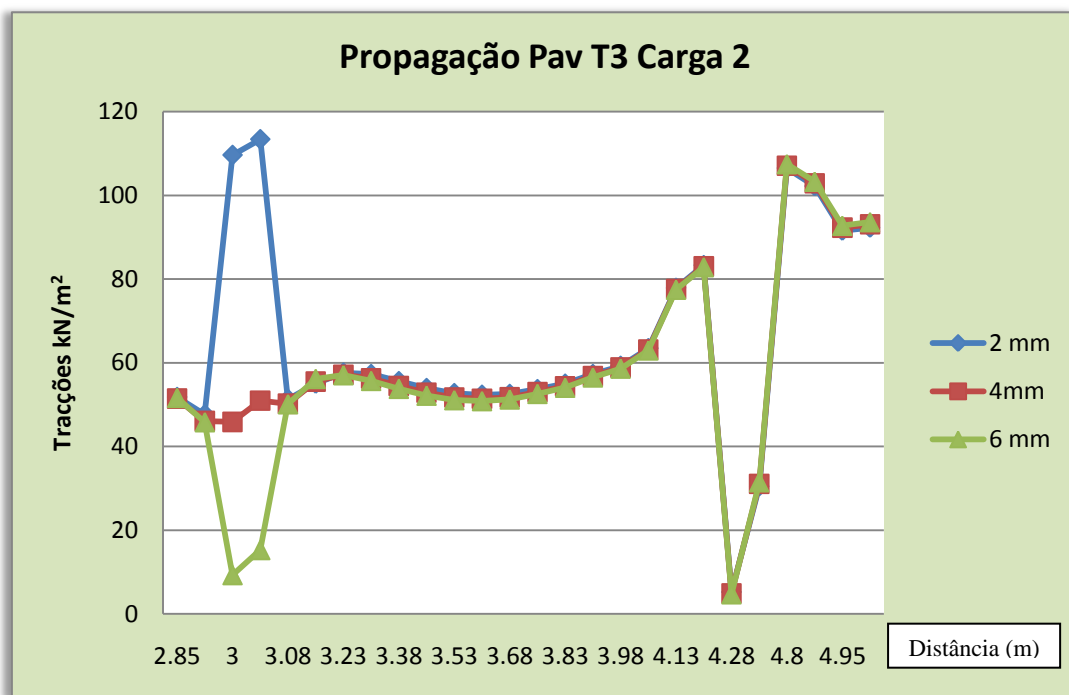


Figura 61. Tracção máxima no pavimento T3 por aplicação da carga 2.

Através do gráfico da Figura 61, observa-se que as maiores tracções se encontram na zona da fenda, para uma abertura de fenda de 2 mm. O que permite concluir que existirá um aumento da abertura de fenda de 2 mm, aquando da aplicação da carga 2, seguindo-se da propagação desta até à superfície do pavimento. Relativamente ao pavimento com a abertura de fenda de 4 mm, na zona da fenda, não apresenta nem picos crescentes, nem decrescentes de tracções. O pavimento com abertura de fenda de 6 mm, apresenta tracções baixas, o que poderá levar a crer que não haverá propagação até à superfície do pavimento, após aplicação da carga 2.

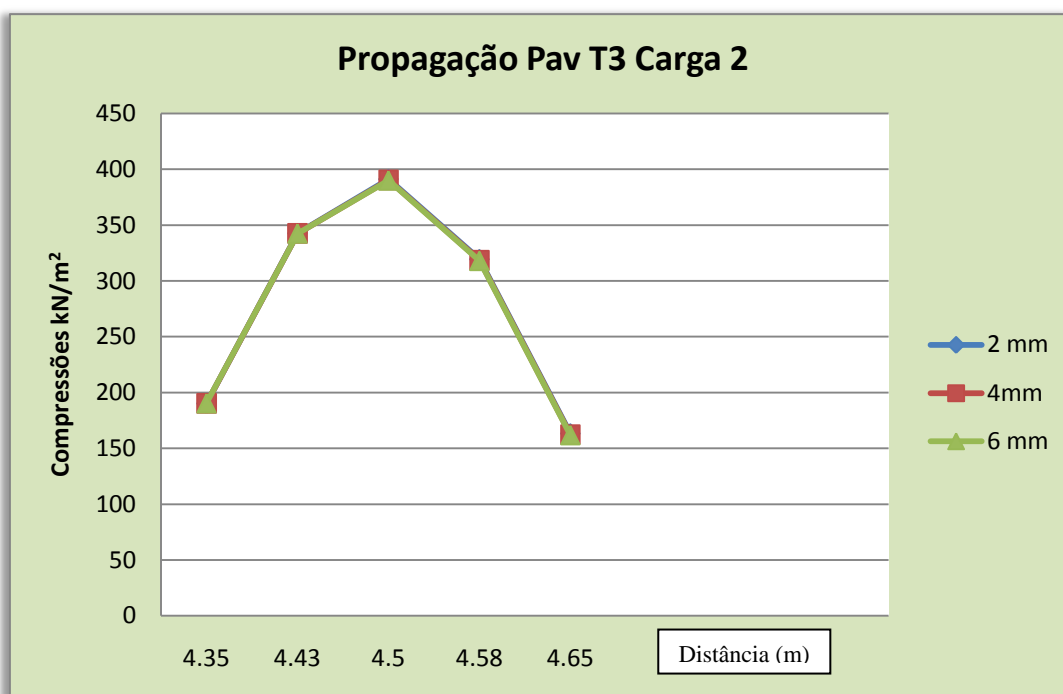


Figura 62. Compressão máxima no pavimento T3 – zona da aplicação da carga 2.

Observa-se pela Figura 62, que o modelo de pavimento T3 apresenta para as três aberturas de fendas, os mesmos valores de compressão na direcção de aplicação da carga 2, logo apresenta o mesmo comportamento ao distribuir as cargas pelas camadas do pavimento.

5.3.3. Modelo de Pavimento T6

5.3.3.1. Carga 1 aplicada junto à fenda:

Modelou-se um pavimento com espessura de camada do tipo T6, com 6 m, fendilhado a meio vão na camada de base, com abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm. Foi sujeito a uma carga de 130 kN/m, aplicada no pavimento numa área de 40 cm, à direita da fenda e a cerca de 5 cm desta.

Para abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm, obtiveram-se as seguintes modelações numéricas indicadas nas Figuras 63, 64 e 65, que representam as tensões máximas instaladas no pavimento:

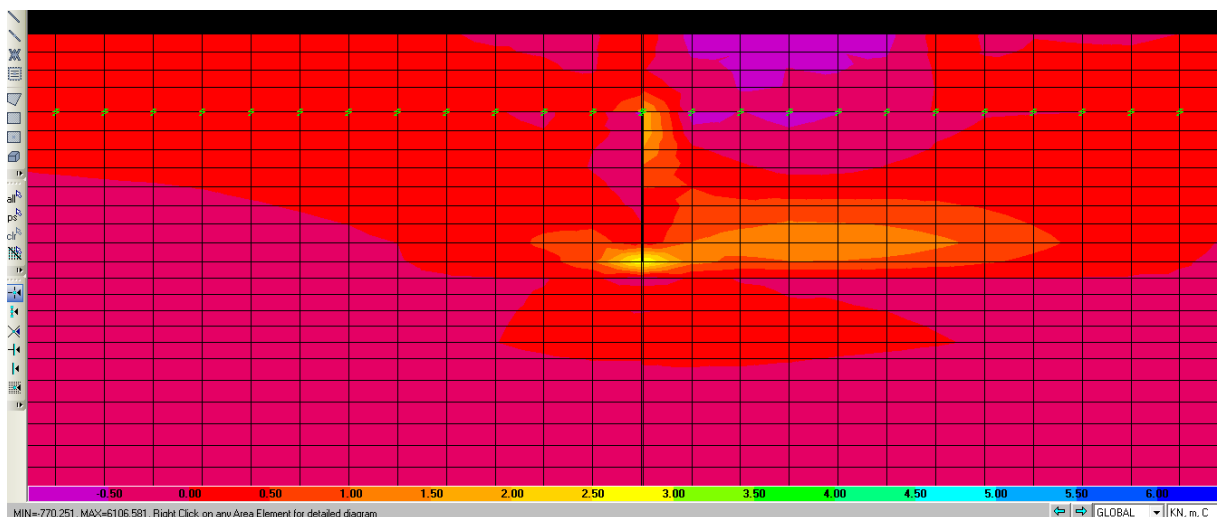


Figura 63. Modelação Numérica do ‘Modelo T6 – carga 1 – fenda 2 mm’. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

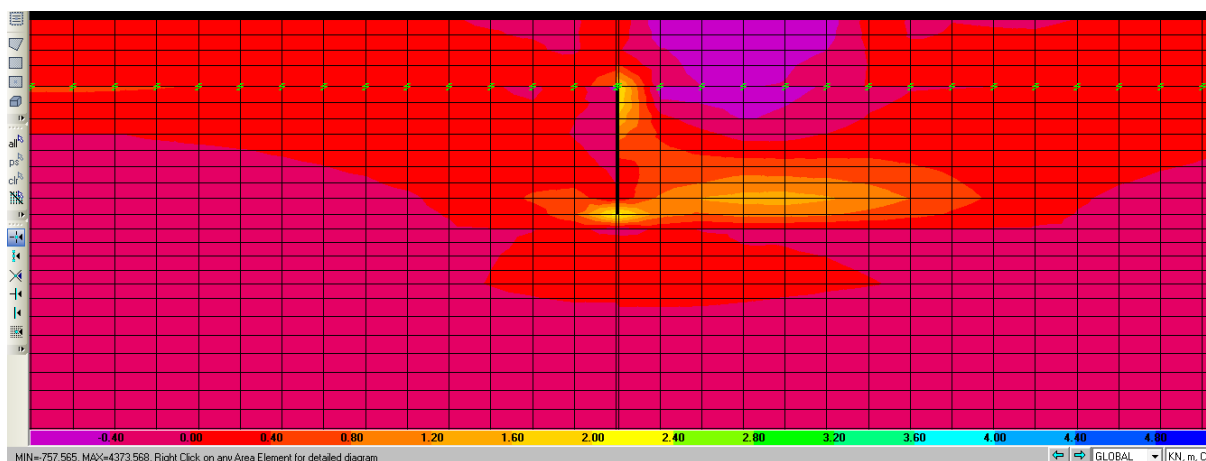


Figura 64. Modelação Numérica do 'Modelo T6 – carga 1 – fenda 4 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

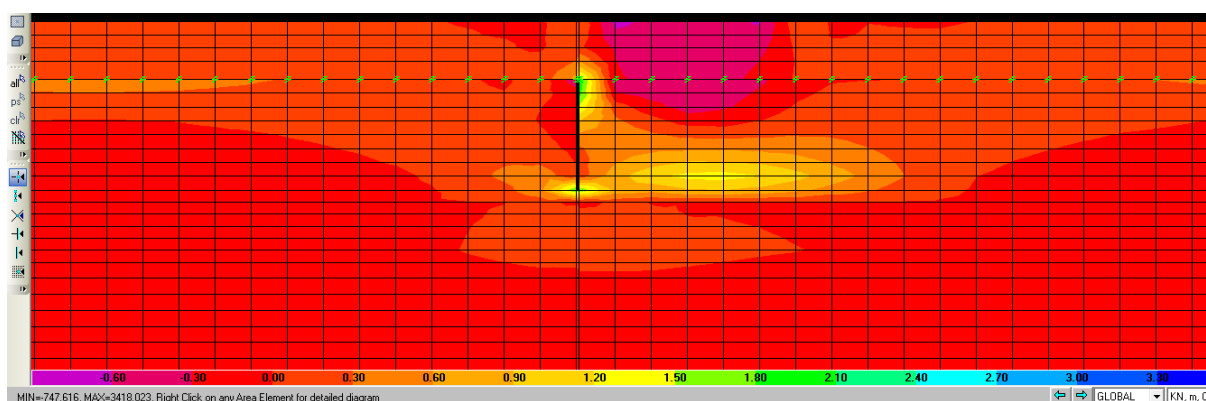


Figura 65. Modelação Numérica do 'Modelo T6 – carga 1 – fenda 6 mm'. Tensões Máximas ($S_{m\acute{a}x}$).

Das modelações, obteve-se graficamente na zona de transição entre a camada de base do pavimento fendilhado e a camada superficial do pavimento, as seguintes tensões:

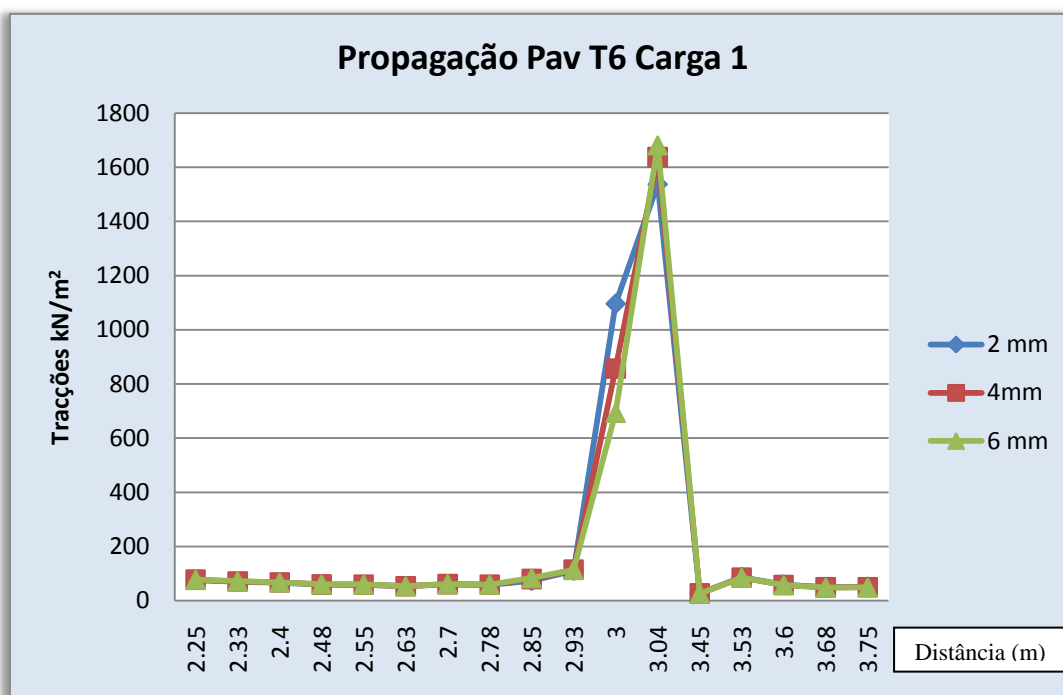


Figura 66. Tracção máxima no pavimento T6 por aplicação da carga 1.

O pavimento semi-rígido do tipo T6 representa em relação ao pavimento do tipo T3, uma redução de 4 cm de espessura de camada superficial com misturas betuminosas, e uma redução de 2 cm de espessura de camada de base com betão pobre.

Por observação do gráfico da Figura 66, verifica-se que o pavimento considerado no modelo T6, apresenta um comportamento quase idêntico ao nível de tracções junto à fenda, para as três aberturas de fenda, tal como para o pavimento do modelo T3. Podendo concluir-se, que num pavimento do tipo T3 e T6, após carregamento junto à fenda, obtém-se uma propagação de fendas quase idêntica para abertura de fendas de 2 mm, 4 mm e 6 mm. Embora seja notável que existe maior tracção para as aberturas de fendas de 4 mm e de 6 mm. O que permite concluir, que serão as maiores aberturas de fendas, as mais propícias e gravosas a propagarem-se até à superfície, tal como já foi referenciado para o modelo de pavimento T3.

Analisando os gráficos das Figuras 56 e 66, relativas às tracções máximas existentes nos modelos de pavimento T3 e T6, por aplicação da carga 1, pode verificar-se que é o modelo T6 que apresenta as maiores tracções, ou seja, a propagação das fendas será maior em camadas mais finas de pavimento.

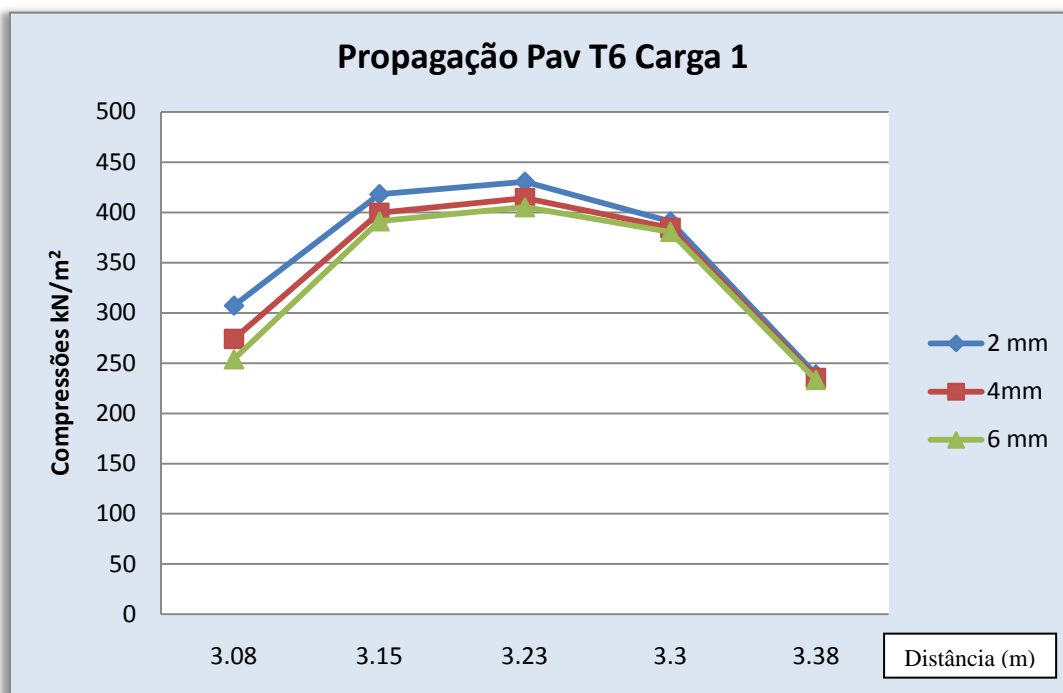


Figura 67. Compressão máxima no pavimento T6 – zona da aplicação da carga 1.

Pelo gráfico representado na Figura 67, é possível verificar que o pavimento fendilhado que apresenta melhor resistência à compressão é o que contém a abertura da fenda de 6 mm, embora não estando muito longe deste mesmo resultado, encontra-se o pavimento fendilhado com abertura de fenda de 4 mm. Sendo que, o pavimento que se apresenta mais comprimido é o que contém a fenda de 2 mm, logo torna-se o pavimento que pior resistirá a cargas elevadas provenientes do tráfego rodoviário, quando este se encontra muito próximo da fenda.

5.3.3.2. Carga 2 aplicada mais distante da fenda:

Fizeram-se ainda modelações numéricas para um modelo de pavimento T6, contendo aberturas de fendas com 2 mm, 4 mm e 6 mm, para uma mesma carga de 130 kN/m, aplicada à direita da fenda, com um carregamento mais afastado desta, a cerca de 1.50 m e com aplicação no pavimento numa área de 40 cm. Originando as tensões máximas, que podem ser observadas nas Figura 68, 69 e 70:

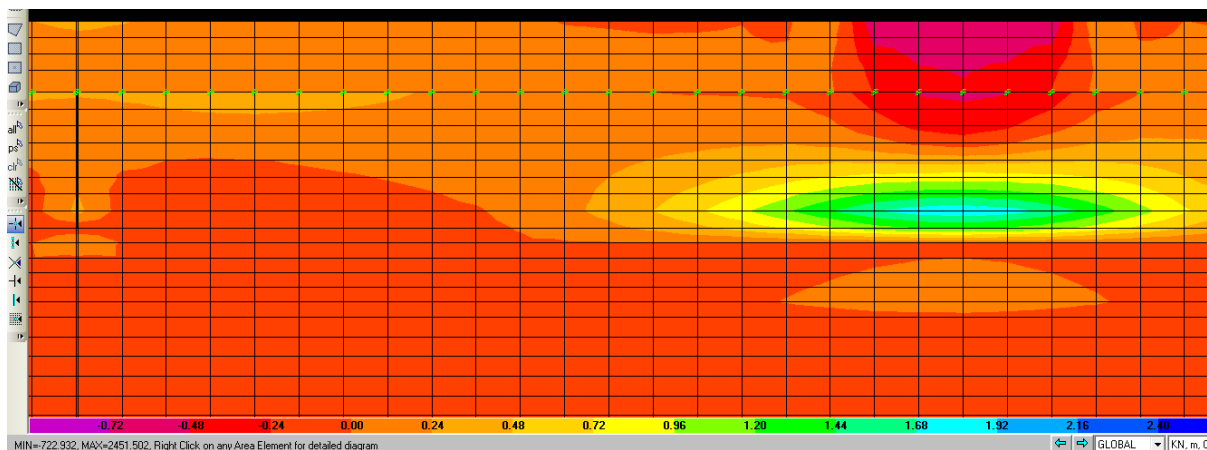


Figura 68. Modelação Numérica do 'Modelo T6 – carga 2 – fenda 2 mm'. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

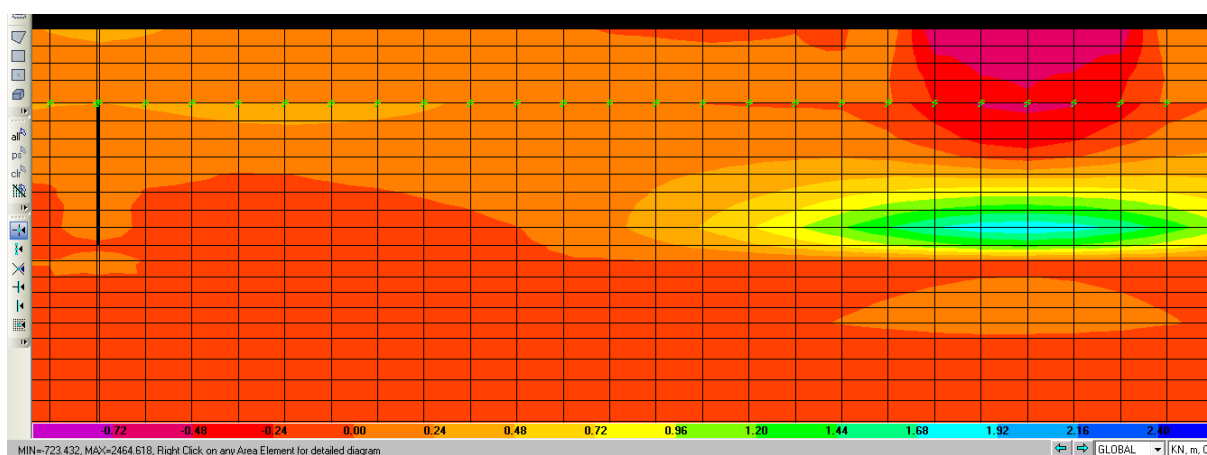


Figura 69. Modelação Numérica do 'Modelo T6 – carga 2 – fenda 4 mm'. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

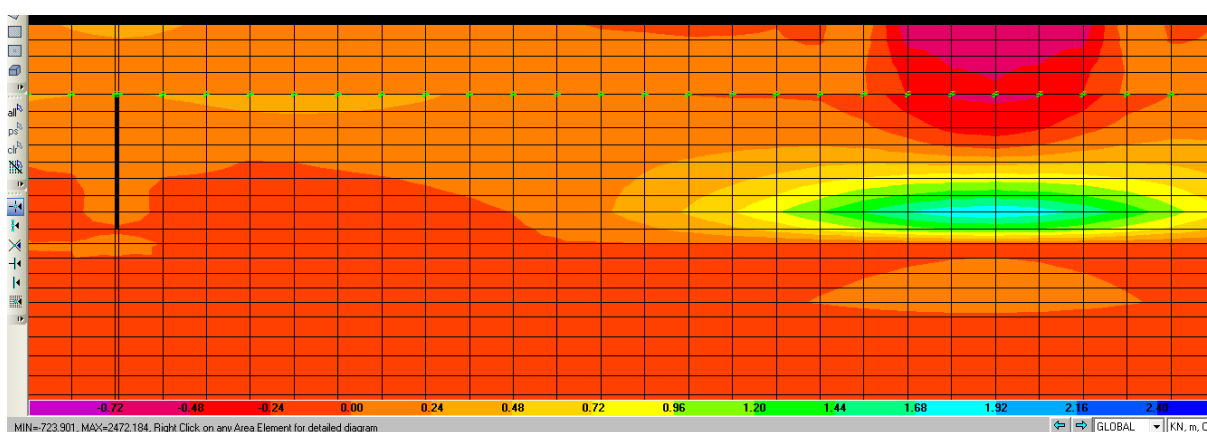


Figura 70. Modelação Numérica do 'Modelo T6 – carga 2 – fenda 6 mm'. Tensões Máximas ($S_{máx}$).

Como para a carga 1 do modelo de pavimento T6, também foram realizados gráficos representativos da zona de transição da camada de base (BP) para a camada superficial

(MB), por aplicação da carga 2. Podem observar-se as tensões máximas instaladas no pavimento, quando este se encontra sujeito a uma aplicação de carga mais afastada da zona da fenda. Verificando-se as seguintes tensões:

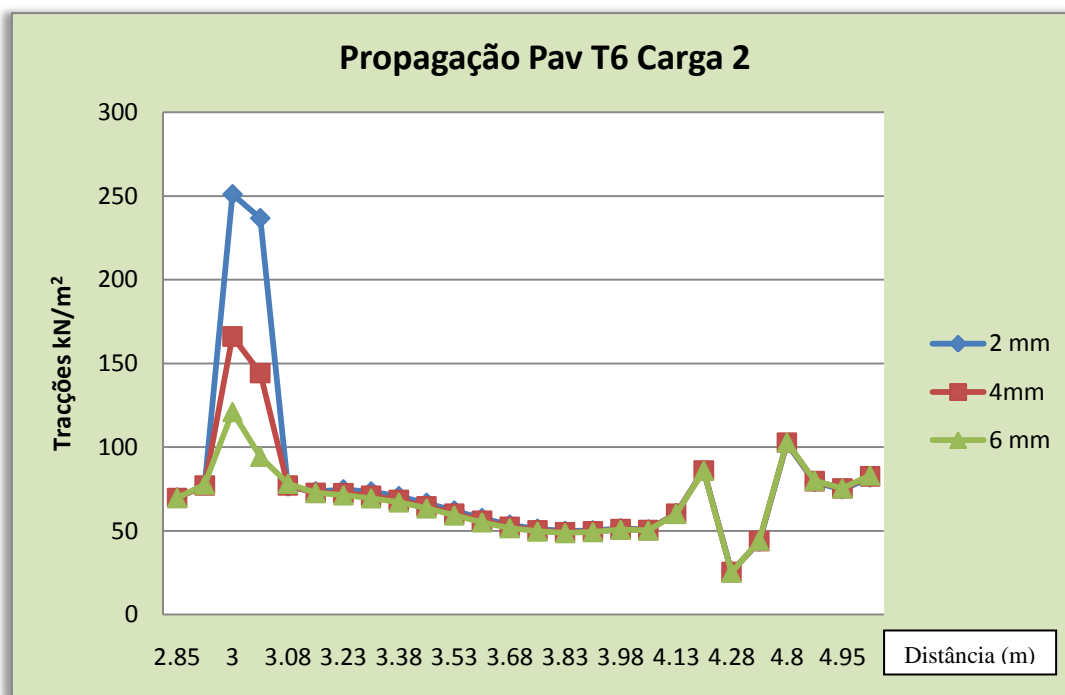


Figura 71. Tração máxima no pavimento T6 por aplicação da carga 2.

Segundo o gráfico da Figura 71, observa-se que as maiores trações se encontram na zona da fenda e para uma abertura de fenda de 2 mm. O que permite concluir que existirá um aumento da abertura de fenda de 2 mm, aquando da aplicação da carga 2, seguindo-se da propagação desta até à superfície do pavimento. Também se verifica que o mesmo acontece para as aberturas de fendas de 4 mm e de 6 mm, embora não tão evidentes como acontece para a abertura de fenda de 2 mm.

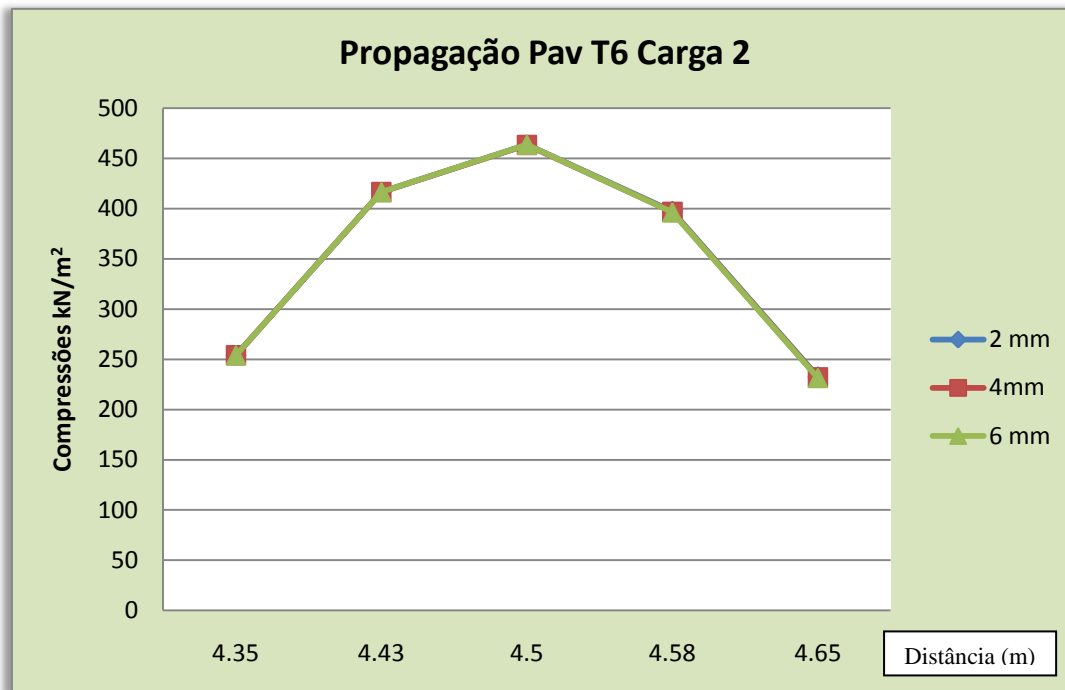


Figura 72. Compressão máxima no pavimento T6 – zona da aplicação da carga 2.

Através do gráfico da Figura 72, observa-se que o modelo de pavimento T6, tal como se verificou na Figura 62 para o modelo de pavimento T3, apresenta para as três aberturas de fendas os mesmos valores de compressão na direcção de aplicação da carga 2, logo pode verificar-se que têm o mesmo comportamento na distribuição das cargas de compressão pelas camadas do pavimento.

Dos gráficos que foram obtidos através das modelações, pode concluir-se resumidamente o seguinte:

Por aplicação da carga 1, conclui-se que para os três tipos de modelos de pavimento, respectivamente T1, T3 e T6, as maiores tracções junto à fenda mostraram ser as que apresentam as maiores aberturas de fendas. Podendo deste modo afirmar-se, que a propagação de fendas será tanto maior, quando maior a abertura de fendas existentes num determinado pavimento do tipo semi-rígido.

Relativamente ao pavimento que apresenta melhor resistência à compressão, por aplicação da carga 1, verificaram-se diferentes conclusões entre os modelos analisados. Para o modelo de pavimento T1, o que apresenta melhor resistência à compressão é o

que contém a abertura de fenda de 4 mm, seguido do de 2 mm. Pelo que, o pavimento que se encontra mais comprimido é o que apresenta uma abertura de fenda de 6 mm, logo, torna-se no pavimento que pior resistirá às cargas provenientes do tráfego rodoviário. Enquanto para os Modelos T3 e T6 se revelou o oposto, ou seja, o pavimento que melhor resiste à compressão é o de abertura de 6mm, seguido do de 4 mm e o mais comprimido revela ser o pavimento com abertura de fenda de 2 mm.

Aquando da aplicação da carga 2, conclui-se para os modelos de pavimento T1, T3 e T6, que as maiores tracções entre a zona da fenda e da aplicação da carga são apresentadas para a abertura de fenda de 6 mm. Enquanto na zona da fenda, as maiores tracções revelam ser para uma abertura de fenda de 2 mm, em que, provavelmente existirá um aumento da abertura de fenda, seguida da propagação da mesma até à superfície. Em relação às compressões obtidas, conclui-se que para o modelo de pavimento T1, quer na zona da fenda, quer na zona de aplicação da carga, se observou para a abertura de fendas de 6 mm as maiores compressões. Enquanto para os modelos T3 e T6, se obteve a mesma linha de compressão, podendo concluir que apresentam o mesmo comportamento na distribuição de esforços de compressão pelas camadas do pavimento, quando a carga 2 é aplicada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

Como principais conclusões, pode-se referir que a propagação das fissuras na camada de base de um pavimento semi-rígido podem ser controladas, mas não é contudo possível evitá-las. Estas ocorrem geralmente ao nível transversal do pavimento, por ocorrência de solicitações provenientes do tráfego rodoviário e constituem uma das principais formas de degradações dos pavimentos semi-rígidos.

Pode observar-se com base nas modelações numéricas efectuadas neste trabalho, que o estado de tensão da camada de base do pavimento semi-rígido, constituída por betão pobre, apresentou junto à fenda e na zona inferior desta camada, as maiores tracções no pavimento, quando este era solicitado. Verificou-se ainda, que propagação de fendas às camadas superiores do pavimento depende da localização da aplicação da carga, ou seja, torna-se mais gravosa quando a carga se localiza mais junto da fenda existente, pois provoca um aumento da abertura da fenda, o que gera maiores tracções nessa zona, fazendo assim com que a camada superior perca a capacidade resistente que lhe é concebida, para que possa conseguir distribuir convenientemente pelas restantes camadas do pavimento, as cargas que lhe são impostas à superfície do pavimento pelo tráfego rodoviário. O que leva a concluir, que ao aplicar a carga mais junto da fenda, a propagação de fendas é tanto maior, quando maior é a abertura de fendas existente na camada de base.

Ao aplicar a carga mais longe da fenda existente, pôde constatar-se que esta também agravou as tracções na zona da fenda. Originou as maiores tracções para uma abertura de fenda de 2mm, o que levará também ao consequente aumento da abertura da fenda de 2mm e à sua propagação até à superfície.

Sendo assim, verificou-se que o que leva ao início da propagação da fenda existente na camada de base de um pavimento do tipo semi-rígido, às camadas superiores do pavimento, se baseia essencialmente na sua constituição. Ou seja, para um determinado carregamento aplicado sobre o pavimento, que apresente na sua constituição uma espessura de material reduzido, aquando da existência de uma fenda no seu interior, irá

provocar com os sucessivos carregamentos o aumento da sua abertura, o que levará à perda de material nessa zona e consequente perda de resistência, seguindo-se a sua propagação até à superfície.

6.2.Desenvolvimentos futuros

- Efectuar modelações numéricas fazendo variar a intensidade da carga, para analisar a variação das tensões no interior de um pavimento semi-rígido, que se encontre fendilhado na camada de base;
- Retirar mais informações das modelações junto à zona da fenda, observando em profundidade as tensões instaladas;
- Proceder ao estudo de modelações numéricas incluindo mais do que uma fenda no mesmo modelo, para verificar em termos de tensões o que acontece na camada superior do pavimento;
- Efectuar as modelações de pavimentos semi-rígidos fendilhados baseados num caso de estudo, para que se possa comparar o modelo numérico com um modelo laboratorial;
- Testar em laboratório quais serão as soluções mais adequadas para evitar a propagação das fissuras existentes na camada de base, fazendo de testes de resistência nos materiais que foram mencionados no Capítulo 4;
- Proceder a estudos para encontrar a percentagem ideal de betão de cimento na camada de base dos pavimentos semi-rígidos, para evitar fendilhação por retracção nessa camada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, ARMINDA MARIA MARQUES DE - Modelação Estrutural de Pavimentos Rodoviários: o uso do método dos elementos de fronteira. Universidade de Coimbra, 2008.

ALVES, TERESA SOFIA FIGUEIREDO - Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários: aplicação prática do Radar de Prospeção e do Deflectómetro de Impacto. Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

ANTUNES, MARIA DE LURDES BAPTISTA DA COSTA - Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaio Dinâmicos. 1993.

BATISTA, FILIPE GOULART DE MEDEIROS REIS - Reabilitação de Pavimentos Flexíveis através de Reciclagem com Cimento. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; PICADO-SANTOS, L. - Pavimentos Rodoviários. Edições Almedina, SA., 2005.

JACINTO, MANUEL ANTÓNIO SOBRAL CAMPOS - Caracterização Estrutural de Pavimentos. Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

IAE - Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV). 1995.

L. QUARESMA; PINELO, A.- Observação do Fendilhamento de Pavimentos Semi-Rígidos: 2º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, 2002.

PEREIRA, ORLANDO ALMEIDA - Pavimentos Rodoviários. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995.

QUARESMA, LUÍS MANUEL TRINDADE - Estudos Relativos a Pavimentos Semi-Rígidos. Dimensionamento e Observação. Lisboa, 1992.

REIS, NUNO FILIPE SANTOS - Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários - Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

SILVA, LUÍS FRANCISCO AMARAL - Pavimentos Aeroportuários: Análise de Soluções Rígidas e de Soluções Flexíveis. Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro, 2009.

VILCHEZ, GUILLERMO ENRIQUE MONTESTRUQUE - Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas. Brasil, 2002.

